

GIL EDUARDO DE ANDRADE

**V-SPORT: Uma Estratégia de Roteamento de Mensagens
Baseada na Previsão sobre a Localização dos Veículos para
VDTN**

**CURITIBA
SETEMBRO 2017**

GIL EDUARDO DE ANDRADE

**V-SPORT: Uma Estratégia de Roteamento de Mensagens
Baseada na Previsão sobre a Localização dos Veículos para
VDTN**

Tese apresentada como requisito parcial à obtenção do título de Doutor em Informática, pelo Programa de Pós-Graduação em Informática da Pontifícia Universidade Católica do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Luiz Augusto de Paula
Lima Jr

CURITIBA
SETEMBRO 2017

Dados da Catalogação na Publicação
Pontifícia Universidade Católica do Paraná
Sistema Integrado de Bibliotecas – SIBI/PUCPR
Biblioteca Central

A553v
2017

Andrade, Gil Eduardo de

V-SPORT : uma estratégia de roteamento de mensagens baseada na
previsão sobre a localização dos veículos para VDTN / Gil Eduardo de
Andrade ; orientador: Luiz Augusto de Paula Lima Jr. – 2017.
xii, 156 f. : il. ; 30 cm

Tese (doutorado) – Pontifícia Universidade Católica do Paraná, Curitiba,
2017

Bibliografia: 150-156

1. Levantamentos de rotas – Processamento de dados. 2. Redes veiculares
ad hoc (Redes de computadores). 3. Sistemas inteligentes de veículos
rodoviários. I. Lima Júnior, Luiz Augusto. II. Pontifícia Universidade Católica
do Paraná. Programa de Pós-Graduação em Informática. III. Título.

CDD 22. ed. – 388.3124

ATA DE SESSÃO PÚBLICA

DEFESA DE TESE DE DOUTORADO Nº 48/2017

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM INFORMÁTICA – PPGIa PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO PARANÁ - PUCPR

Em sessão pública realizada às 14h00 de 09 de Outubro de 2017, na Sala 220 – Escola de Negócios, ocorreu a defesa da tese de doutorado intitulada “**V-SPORT: Uma estratégia de roteamento de Mensagens baseada na previsão sobre a localização dos Veículos para Redes Veiculares Tolerantes a atrasos e Desconexões**” elaborada pelo aluno **Gil Eduardo Andrade**, como requisito parcial para a obtenção do título de **Doutor em Informática**, na área de concentração **Ciência da Computação**, perante a banca examinadora composta pelos seguintes membros:

Prof. Dr. Luiz Augusto de Paula Lima Junior (orientador) - PPGIa/PUCPR

Prof. Dr. Alcides Calsavara – PUCPR

Prof. Dr. Henri Frederico Eberspacher - PUCPR

Prof. Dr. Carlos Alberto Maziero – UFPR

Prof.ª Dr.ª Gisane Aparecida Michelin – UNICENTRO

Após a apresentação da tese pelo aluno e correspondente arguição, a banca examinadora emitiu o seguinte parecer sobre a tese:

Membro	Parecer
Prof. Dr. Luiz Augusto de Paula L. Junior	<input checked="" type="checkbox"/> Aprovada () Reprovada
Prof. Dr. Alcides Calsavara	<input checked="" type="checkbox"/> Aprovada () Reprovada
Prof. Dr. Henri Frederico Eberspacher	<input checked="" type="checkbox"/> Aprovada () Reprovada
Prof. Dr. Carlos Alberto Maziero	<input checked="" type="checkbox"/> Aprovada () Reprovada
Prof.ª Dr.ª Gisane Aparecida Michelin	<input checked="" type="checkbox"/> Aprovada () Reprovada

Portanto, conforme as normas regimentais do PPGIa e da PUCPR, a tese foi considerada:

APROVADO

(aprovação condicionada ao atendimento integral das correções e melhorias recomendadas pela banca examinadora, conforme anexo, dentro do prazo regimental)

() **REPROVADO**

E, para constar, lavrou-se a presente ata que vai assinada por todos os membros da banca examinadora. Curitiba, 09 de Outubro de 2017.

Prof. Dr. Luiz Augusto de Paula Lima Junior

Prof. Dr. Alcides Calsavara

Prof. Dr. Henri Frederico Eberspacher

Prof. Dr. Carlos Alberto Maziero

Prof.ª Dr.ª Gisane Aparecida Michelin



Dedicatória

A minha família,

Que me ensinou a importância de lutar pelos meus ideais, podendo assim realizar todos os meus objetivos.

Agradecimentos

A todas as pessoas que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho.

Epígrafe

“...o comprometimento é a base das nossas conquistas, quando nos comprometemos com o que acreditamos ser correto deixamos de lado as dúvidas, os por ques, e assim caminhamos, passo a passo, rumo ao sucesso, construímos a nossa felicidade...”

(Gil Eduardo de Andrade)

Sumário

Lista de Figuras	xiii
Lista de Tabelas	xviii
Lista de Siglas	xxi
Lista de Símbolos	xxii
Resumo	xxiii
Abstract	xxiv
1 Introdução	1
1.1 Objetivos	4
1.2 Motivação e Desafios	5
1.3 Contribuições	6
1.4 Métodos e Práticas	6
1.5 Organização do Documento	7
2 Redes Tolerantes a Atrasos e Desconexões	8
2.1 Arquitetura DTN	9
2.2 Contatos e Tipos de Contatos	13
2.2.1 Contatos Persistentes.....	14
2.2.2 Contatos Sob Demanda.....	14
2.2.3 Contatos Programados	14
2.2.4 Contatos Oportunistas	14

2.2.5	Contatos Previsíveis	15
2.3	Agregados e Transferência de Custódia	15
2.3.1	Opções de entrega	17
2.3.2	Modelos de Disseminação	18
2.4	Métricas de Avaliação em DTN	18
2.5	Considerações Finais	19
3	Redes Veiculares	21
3.1	Redes Veiculares Ad hoc — VANETs	22
3.1.1	Componentes e Funcionamento	23
3.1.2	Padrões de Comunicação Veicular	25
3.2	Redes Veiculares Tolerantes a Atrasos — VDTNs	27
3.2.1	DTN x VDTN	28
3.2.2	VANET x VDTN	30
3.2.3	Desafios do Ambiente VDTN	31
3.2.3.1	Obtenção da Localização dos Nós	31
3.2.3.2	Funcionamento Baseado nas Unidades de Acostamento	32
3.2.3.3	Consumo de Recursos <i>vs</i> Taxa de Entrega	32
3.2.3.4	Gerenciamento de Buffer	33
3.3	Considerações Finais	33
4	Modelos de Mobilidade	35
4.1	Considerações Iniciais	35
4.2	Categorização dos Modelos de Mobilidade	36
4.2.1	Rotas e Modelos de Mobilidade Sintéticos	36
4.2.2	Modelos de Mobilidade Individuais e de Grupo	37
4.2.3	Modelos de Mobilidade Humano, Animal e Veicular	38

4.2.4	Modelos de Mobilidade para Situação Normal e Situação Especial	38
4.2.5	Outros Modelos de Mobilidade	39
4.3	Modelos de Mobilidade	40
4.3.1	Modelo <i>Random Walk</i>	40
4.3.2	Modelo <i>Random Waypoint</i>	41
4.3.3	Modelo <i>Random Direction</i>	42
4.3.4	Modelo Gauss-Markov	43
4.3.5	Modelo Manhattan	44
4.3.6	Modelo <i>Column</i>	45
4.3.7	Modelo <i>Pursue</i>	46
4.3.8	Modelo <i>Nomadic Community</i>	47
4.4	Seleção de Modelos de Mobilidade Apropriados	48
4.5	Considerações Finais	49
5	Estratégias de Roteamento	51
5.1	Roteamento em Redes Tolerantes a Atrasos e Desconexões	51
5.1.1	Roteamento com Disseminação Epidêmica	52
5.1.1.1	Epidemic Routing	53
5.1.1.2	Spray And Wait	54
5.1.2	Roteamento com Disseminação Probabilística	55
5.1.2.1	Shortest Expected Path Routing	55
5.1.2.2	PRoPHET	56
5.1.2.3	MaxProp	57
5.1.2.4	NECTAR	58
5.1.3	Análise Comparativa e Contribuição das Estratégias	59
5.2	Roteamento em Redes Veiculares	61
5.2.1	Arquitetura e Encaminhamento	62

5.2.2	Estratégias de Roteamento Baseadas em Posição – VANET.....	64
5.2.2.1	Roteamento Guloso de Perímetro ou <i>GPSR</i>	64
5.2.2.2	Roteamento Geográfico de Origem ou <i>GSR</i>	65
5.2.2.3	Roteamento Guloso Consciente sobre o Tráfego ou <i>GyTAR</i>	66
5.2.2.4	Roteamento Veicular Direcional Baseado em Posição ou <i>PDVR</i>	67
5.2.2.5	Roteamento Guloso Direcional ou <i>DGR</i>	68
5.2.3	Estratégias de Roteamento Baseadas em Posição – VDTN.....	69
5.2.3.1	Roteamento Geográfico Oportunista ou <i>GeoOpps</i>	69
5.2.3.2	Roteamento Consciente da Distância com Controle de Cópia ou <i>DARCC</i> .	70
5.2.3.3	Roteamento Adaptativo a Densidade com Nós Conscientes ou <i>DAWN</i>	71
5.2.3.4	Roteamento de Spray Geográfico para VDTN ou <i>GeoSpray</i>	73
5.2.4	Análise Comparativa e Contribuição das Estratégias.....	73
5.3	Considerações Finais.....	76
6	<i>V-SPORT</i>: Estratégia de Roteamento de Mensagens para Redes Veiculares Tolerantes a Atrasos.....	78
6.1	<i>V-SPORT</i>	78
6.1.1	Conceitos e Definições Fundamentais.....	78
6.1.2	Visão Geral dos Modelos de Mobilidade e Previsão sobre a Localização do Destino.....	80
6.1.2.1	Modelo de previsão baseado na distância euclidiana.....	82
6.1.2.2	Modelo de previsão baseado no deslocamento máximo.....	84
6.1.2.3	Considerações gerais sobre os modelos de previsão.....	85
6.1.3	A Estratégia de Roteamento <i>V-SPORT</i>	86
6.1.4	Modelo Formal de Funcionamento.....	94
6.1.5	Considerações Finais.....	100
7	Validação da Proposta.....	101

7.1	Ambiente e Parâmetros de Simulação	101
7.2	Metodologia e Procedimentos de Avaliação	105
7.3	Fatores de Impacto Avaliados	106
7.3.1	Densidade de Rede	107
7.3.2	Raio de Alcance das Antenas	107
7.3.3	Tempo de Vida das Mensagens – <i>TTL</i>	108
7.3.4	Velocidade dos Veículos	108
7.3.5	Capacidade de Armazenamento em Buffer	109
7.4	Métricas de Desempenho Avaliadas	109
7.5	Procedimentos de Simulação	110
7.5.1	Análise Individual dos Modelos de Previsão e Encaminhamento	110
7.5.2	Análise Integral da Estratégia <i>V-SPORT</i>	112
7.6	Resultados Obtidos	112
7.6.1	Experimentos Iniciais: Análise Individualizada	112
7.6.2	Experimentos Finais: Análise Conjunta	118
7.6.2.1	O impacto da variação da densidade de rede – Número de veículos	118
7.6.2.2	O impacto da variação do raio de transmissão	122
7.6.2.3	O impacto da variação do tempo de vida das mensagens – <i>TTL</i>	126
7.6.2.4	O impacto da variação da velocidade dos veículos	131
7.6.2.5	O impacto da variação do buffer de armazenamento	134
7.7	Considerações Finais	138
8	Conclusão	140
8.1	Objetivos, Desafios e Resultados Alcançados	141
8.1.1	Perspectivas e Possibilidades	142
8.2	Trabalhos Futuros	143
8.2.1	Otimização e Mescla dos Modelos	144

8.2.2	Desenvolvimento de Novas Metodologias	145
8.3	Contexto Histórico da Pesquisa	146
8.3.1	Professores e Colaboradores	147
8.3.2	Produções Científicas	148
	Referências	150

Lista de Figuras

Figura 1	Arquitetura DTN.	10
Figura 2	Redes Regionais - Técnica de <i>store-carry-and-forward</i>	11
Figura 3	Transferência de Custódia (TC).	16
Figura 4	Componentes e Funcionamento – VANET.	24
Figura 5	Comunicação Padrão WAVE – WBSS 01: formada apenas por OBUs; WBSS 02: formada por OBUs e RSU.	25
Figura 6	Pilha de Protocolos WAVE.	26
Figura 7	Comunicação Dedicada de Curto Alcance – DSRC.	27
Figura 8	Área de Simulação Ilimitada.	40
Figura 9	Modelo de Mobilidade <i>Random Walk</i> com intervalo de tempo constante.	41
Figura 10	Modelo de Mobilidade <i>Random Waypoint</i>	42
Figura 11	Modelo de Mobilidade <i>Random Direction</i>	43
Figura 12	Modelo de Mobilidade Gauss-Markov.	44

Figura 13	Modelo de Mobilidade Manhattan.	45
Figura 14	Modelo de Mobilidade <i>Column</i>	46
Figura 15	Modelo de Mobilidade <i>Pursue</i>	47
Figura 16	Modelo de Mobilidade <i>Nomadic Community</i>	48
Figura 17	Estratégia de Encaminhamento <i>GPSR</i>	64
Figura 18	Estratégia de Encaminhamento <i>GSR</i>	65
Figura 19	Estratégia de Encaminhamento <i>GyTAR</i>	67
Figura 20	Estratégia de Encaminhamento <i>PDVR</i>	68
Figura 21	Estratégia de Encaminhamento <i>DARCC</i>	71
Figura 22	Estratégia de Encaminhamento <i>DAWN</i>	72
Figura 23	Definições para Rede veicular Tolerante a Atraso e Localização dos nós.	79
Figura 24	Exemplo para o Mapa Digital, vértices (cruzamentos) e arestas (ruas).	80
Figura 25	Arquitetura simplificada dos modelos de previsão e encaminhamento.	82
Figura 26	Modelo de previsão sobre a localização do veículo de destino baseado na distância euclidiana.	83

Figura 27	Modelo de previsão sobre a localização do veículo de destino baseado no deslocamento máximo.	85
Figura 28	As fases de operação da estratégia de roteamento <i>V-SPORT</i>	86
Figura 29	Métodos de seleção do próximo cruzamento: baseado na distância euclidiana e baseado na menor distância no mapa.	87
Figura 30	Exemplo do funcionamento da estratégia de encaminhamento proposta pelo <i>V-SPORT</i> em sua fase de roteamento e pré-entrega.	88
Figura 31	Modos de entrega de mensagem previstos pelo <i>V-SPORT</i> – (a) Âncora e Destino encontram-se diretamente; (b) Âncora encontra-se na mesma rua, no mesmo sentido e à frente do Destino; (c) Âncora encontra-se na mesma rua, no mesmo sentido e atrás de Destino.	93
Figura 32	Diagrama de estados para o funcionamento do <i>V-SPORT</i>	95
Figura 33	Arquitetura de Rede VDTN: (a) Infraestruturada pura (V2I), (b) Veicular pura (V2V), (c) Híbrida (V2I e V2V).	102
Figura 34	Simulador The ONE – Cidade de Helsinki – Arquitetura Veicular pura (V2V).	103
Figura 35	Erro (em metros) apresentado pelo modelo de previsão, considerando a idade do contato.	113
Figura 36	Aproximação (em metros) das mensagens, ao longo do tempo, com relação ao veículo de destino.	115
Figura 37	Taxa de entrega de mensagens para os modelos de previsão e encaminha-	

mento.	116
Figura 38 Taxa de entrega de mensagens após 30 minutos.	117
Figura 39 O impacto da variação da densidade de rede sobre a taxa de entrega. .	119
Figura 40 O impacto da variação da densidade de rede sobre o <i>overhead</i>	120
Figura 41 O impacto da variação da densidade de rede sobre a latência média. ..	122
Figura 42 O impacto da variação do raio de alcance das antenas sobre a taxa de entrega de mensagens.	123
Figura 43 O impacto da variação do raio de alcance das antenas sobre o <i>overhead</i> . 125	
Figura 44 O impacto da variação do raio de alcance das antenas sobre a latência ou atraso médio.	126
Figura 45 O impacto da variação do <i>TTL</i> sobre a Taxa de Entrega.	127
Figura 46 O impacto da variação do <i>TTL</i> sobre o <i>overhead</i>	129
Figura 47 O impacto da variação do <i>TTL</i> sobre a latência média.	130
Figura 48 O impacto da variação da velocidade dos veículos sobre a taxa de entrega de mensagens.	131
Figura 49 O impacto da variação da velocidade dos veículos sobre o <i>overhead</i>	133
Figura 50 O impacto da variação da velocidade dos veículos sobre a latência média. 134	

Figura 51	O impacto da variação do buffer de armazenamento sobre a taxa de entrega.	135
Figura 52	O impacto da variação do buffer de armazenamento sobre o <i>overhead</i>	137
Figura 53	O impacto da variação do buffer de armazenamento sobre a latência ou atraso médio.	138

Lista de Tabelas

Tabela 1	Análise comparativa: estratégias de roteamento projetadas para o ambiente DTN.	60
Tabela 2	Comparação entre as estratégias de roteamento.	63
Tabela 3	Análise comparativa: estratégias de roteamento projetadas para o ambiente veicular.	75
Tabela 4	Tabela de informações do contato.	90
Tabela 5	Tabela de informações do contato – (a) veículo 1, (b) veículo 5.	91
Tabela 6	Tabela de informações do contato para o veículo 1 – após encontrar o veículo 5.	92
Tabela 7	Topologia e ambiente de simulação utilizado pelas estratégias de roteamento VDTN.	103
Tabela 8	Parâmetros de simulação	104
Tabela 9	Erro (em metros) apresentado pelo modelo de previsão, considerando a idade do contato.	113
Tabela 10	Aproximação (em metros) das mensagens ao longo do tempo com relação ao veículo de destino.	114

Tabela 11	Taxa de entrega de mensagens (em porcentagem).	115
Tabela 12	Taxa de entrega de mensagens (em porcentagem) após 30 minutos.	117
Tabela 13	O impacto da variação da densidade de rede sobre a taxa de entrega (em porcentagem).	118
Tabela 14	O impacto da variação da densidade de rede sobre o <i>overhead</i>	120
Tabela 15	O impacto da variação da densidade de rede sobre a latência média (em minutos).	121
Tabela 16	O impacto da variação do raio de alcance das antenas sobre a taxa de entrega de mensagens (em porcentagem).	123
Tabela 17	O impacto da variação do raio de alcance das antenas sobre o <i>overhead</i>	124
Tabela 18	O impacto da variação do raio de alcance das antenas sobre a latência ou atraso médio (em minutos).	125
Tabela 19	O impacto da variação do <i>TTL</i> (em minutos) sobre a taxa de entrega (em porcentagem).	127
Tabela 20	O impacto da variação do <i>TTL</i> (em minutos) sobre o <i>overhead</i>	128
Tabela 21	O impacto da variação do <i>TTL</i> (em minutos) sobre a latência média (em minutos).	130
Tabela 22	O impacto da variação da velocidade dos veículos sobre a taxa de entrega de mensagens (em porcentagem).	131

Tabela 23	O impacto da variação da velocidade dos veículos sobre o <i>overhead</i>	132
Tabela 24	O impacto da variação da velocidade dos veículos sobre a latência média (minutos).	133
Tabela 25	O impacto da variação do buffer de armazenamento sobre a taxa de entrega (em porcentagem).	135
Tabela 26	O impacto da variação do buffer de armazenamento sobre o <i>overhead</i>	136
Tabela 27	O impacto da variação do buffer de armazenamento sobre a latência ou atraso médio (em minutos).	137

Lista de Siglas

DTN	Delay and Disruption Tolerant Network
VDTN	Vehicular Delay Tolerant Network
VANET	Veicular Ad Hoc Networks
V2V	Vehicle-to-vehicle communication
WDM	Working Day Movement Model
TCP	Transmission Control Protocol
IP	Internet Protocol
ADU	Application Data Unit
TC	Custody Transfer
ACK	Acknowledgement Menssage
V2I	Vehicle-to-infrastructure Communication
OBU	On-Board Unit
RSU	Roadside Unit
GNSS	Global Navigation Satellite System
GPS	Global Positioning System
DSRC	Dedicated Short-range Communications
WAVE	Wireless Access in Vehicular Environments
WBSS	WAVE-mode Basic Service Set
BSS	Basic Service Set
MANET	Mobile Ad hoc Network
NI	Neighborhood Index
TIC	Contact Information Table

Lista de Símbolos

G	grafo que representa as redes veiculares tolerantes a atrasos e desconexões
N	conjunto de veículos ou nós
E	conjunto de pares de nós que possuem um canal de comunicação estabelecido
r	raio de comunicação dos veículos ou nós
$V(n_i)$	velocidade do veículo ou nó n_i
$\delta(a, b)$	distancia euclidiana entre a e b
M	grafo direcionado que representa um mapa digital
C	conjunto de vértices ou cruzamentos de vias
S	arestas ou ruas que conectam dois vértices ou cruzamentos de vias
$L(c_i)$	localização fixa do cruzamentos c_i
$R(c_o, c_d)$	rota de encaminhamento da origem c_o até o destino c_d
D_R	distancia percorrida para uma rota veicular
d_{max}	distância máxima de deslocamento do veículo ou nó

Resumo

Devido aos altos níveis de mobilidade, algoritmos de roteamento projetados para o ambiente veicular dependem de uma boa estimativa sobre a localização dos veículos, bem como de uma eficiente estratégia de roteamento. Entretanto, é praticamente impossível prever com total precisão a localização atualizada de um veículo, a menos que ela seja explicitamente informada. Neste contexto, estimativas precisam ser constantemente efetuadas, permitindo que a decisão sobre a retransmissão das mensagens seja tomada de maneira oportuna. Atualmente, as principais estratégias de roteamento projetadas para o ambiente veicular assumem a existência de infraestruturas externas capazes de informar a localização atualizada de todos veículos. Entretanto, questões técnicas, financeiras e geográficas inviabilizam que tais infraestruturas estejam presentes em toda malha rodoviária, impossibilitando o funcionamento de serviços externos capazes de fornecer, a todo momento, a posição atual dos veículos. Diante desse desafio, e buscando agilizar a troca de mensagens entre os veículos, o algoritmo de roteamento descrito nesta tese propõe um modelo matemático de previsão sobre a localização do veículo de destino, operando em conjunto com uma estratégia de roteamento baseada nessa previsão. Para o modelo proposto, toda vez que o nó que detém a custódia de uma mensagem faz contato com um veículo trafegando em direção a um cruzamento que encontra-se mais próximo da localização prevista para o destino, a mensagem é retransmitida a ele. A estratégia considera que, se a distância entre o veículo encontrado e o destino está diminuindo, ele faz parte da melhor rota que permite efetuar a entrega da mensagem. O modelo proposto foi avaliado por meio de simulação e, em comparação com os resultados produzidos por estratégias alternativas, alcançando resultados próximos ao ideal para taxa de entrega de mensagens e *overhead* na maioria dos cenários analisados.

Palavras-chave: Roteamento de mensagem, VDTN, modelo de previsão, V-SPORT.

Abstract

Due to the high levels of mobility, routing algorithms designed for the vehicular environment depend on a good estimation of vehicle location and an efficient routing strategy. However, it is practically impossible to predict the current location of a vehicle, unless it is explicitly informed. In this context, estimates need to be constantly computed, since they influence the decision about when the retransmission of the messages should occur. Currently, the main routing strategies designed for the vehicular environment presuppose the existence of external infrastructures capable of informing the updated location of the vehicles. However, technical, financial and geographical issues make it impossible to guarantee the existence of external communication services on every road network capable of providing at all times the current position of all vehicles. Faced with this challenge, and in order to optimize the exchange of messages between vehicles, the routing algorithm described in this thesis proposes a mathematical model of prediction about the location of the destination vehicle, herewith a routing strategy based on this information. Whenever a node, in custody of a message, makes contact with a vehicle traveling towards a crossover that is closest to the estimated location, the message is relayed to it. The strategy considers that if the distance between the vehicle found and the destination is decreasing, it is part of the route that allows the delivery of the message. The proposed model was evaluated through simulation and, in comparison with the results produced by alternative strategies, it achieved results close to ideal for message delivery rate and overhead in most of the scenarios analyzed.

Key-words: Message routing, VDTN, prediction model, V-SPORT.

1 Introdução

Os avanços da tecnologia na fabricação de componentes eletrônicos têm aumentado a capacidade de armazenamento, processamento e comunicação dos dispositivos afetando de forma positiva a computação móvel. Para Mark Wiser, pai da computação ubíqua¹, o usuário estará, num futuro próximo, centralizado na tarefa em que realiza e não mais relacionado prioritariamente com a ferramenta utilizada tornando a tecnologia enraizada implicitamente no contexto. Ele acredita que: “as tecnologias mais profundas são aquelas que desaparecem. Elas se entrelaçam com o cotidiano até que se tornem indistinguíveis dele” (WEISER, 1999).

Os serviços de comunicação de dados tem se tornado parte fundamental do cotidiano. Um exemplo do quanto as redes de comunicação de dados precisam ser ubíquas atualmente é a grande variedade de serviços disponíveis na Internet atendendo as necessidades de seus usuários. Atualmente, as grandes metrópoles de países desenvolvidos contam com uma enorme quantidade de redes de comunicação de dados que oferecem serviços através de diversas tecnologias, tais como: xDSL, *cable modem* e rede celular 3G/4G. A existência de uma conectividade fim-a-fim entre os terminais que desejam se comunicar é uma idéia básica para o bom funcionamento dessas redes convencionais como, por exemplo, as redes cabeadas e as redes ad hoc.

O sucesso na descoberta de uma rota, para maioria dos protocolos de roteamento, só é possível caso exista um caminho entre um nó de origem e outro de destino. Entretanto, existem cenários onde nem sempre é possível garantir essa conectividade fim-a-fim, seja por ela nunca existir ou por ser intermitente, como no caso das redes de sensores (KARL; WILLIG, 2005), da Internet interplanetária (FALL, 2003) e das redes móveis terrestres. Isso ocorre porque há ambientes que possuem escassez na disponibilidade de recursos de comunicação. Tal característica tem sua origem na inexistência de uma infraestrutura adequada, normalmente vinculada a questões geográficas (regiões rurais) e financeiras

¹Para computação ubíqua ou pervasiva, dispositivos eletrônicos como computadores e *smartphones* estarão presentes em todos os lugares e em todos os momentos auxiliando as pessoas sem que elas tenham consciência disso.

(recursos limitados ou necessidade de investimentos muito elevados).

Para atender esses cenários desafiadores, uma nova categoria de rede de comunicação foi criada, sendo denominada Rede Tolerante a Atrasos e Desconexões ou apenas DTN (*Delay and Disruption Tolerant Network*). A DTN pode ser vista como uma rede sem fio que possui conexões ocasionais e particionamentos frequentes, ocasionados não apenas pela falta de uma infraestrutura fixa pré-existente, mas também pela grande mobilidade dos inúmeros nós² que a compõem. As Redes Veiculares Tolerantes a Atrasos ou VDTN (*Vehicular Delay Tolerant Networks*) são um caso especial de Redes Veiculares Ad-hoc ou VANET (*Vehicular Ad Hoc Network*) onde o paradigma DTN é necessário, já que não há garantia sobre a existência de conectividade fim-a-fim entre dois nós (FALL; FARREL, 2008).

Na última década, com a crescente disponibilidade de novas aplicações e serviços voltados ao ambiente veicular (KARAGIANNIS et al., 2011), houve um aumento considerável no número de pesquisas que buscam superar os desafios envolvendo comunicação. Essas aplicações, em sua maioria, permitem coletar informações sobre veículos, tráfego e condição das vias, que são capturadas por conjunto de sensores a bordo dos veículos e disponíveis ao longo das vias. A partir destas aplicações, e da possibilidade de transmissão das informações entre os automóveis e/ou infraestruturas rodoviárias, sistemas como o ITS (Sistema Inteligente de Transporte) têm sido estudados e propostos como aplicações avançadas com o objetivo de fornecer serviços inovadores como a gestão do tráfego veicular (KANG et al., 2015).

Nas redes veiculares, os automóveis são equipados com computador de bordo, que visa fornecer alta capacidade de processamento; dispositivos de comunicação sem fio; sensores; e sistemas de navegação. Esse conjunto de tecnologias, juntamente com a mobilidade dos veículos trafegando pelas vias, cria, de maneira espontânea, uma rede de dados altamente dinâmica onde a troca de informações pode ser usada, por exemplo, para detectar e reduzir o congestionamento veicular em áreas urbanas (TERROSO-SAEENZ et al., 2012). O roteamento desses dados torna-se possível através da comunicação veículo-a-veículo ou V2V (*Inter-Vehicle Communication*) (KNORR et al., 2012). Além dos sistemas de gestão de tráfego, as aplicações voltadas para ambiente veicular também fornecem serviços de informação, lazer e entretenimento, como aplicativos de compartilhamento de conteúdo (músicas, filmes) e jogos.

²Denomina-se como nó, nesta tese, os elementos que compõem as redes tolerantes a atrasos e desconexões e são capazes de transmitir e receber mensagens.

Neste contexto, a comunicação de dados nas redes veiculares passa a ter papel fundamental para que as aplicações e serviços desenvolvidos para esse ambiente atinjam seus objetivos. Entretanto, como praticamente todos os veículos encontram-se em constante movimento, tornando a topologia da rede altamente dinâmica, faz-se complexa a tarefa de rotear informações entre veículos sem a garantia de conectividade fim a fim. A alta velocidade dos veículos também produz intervalos de comunicação muito curtos, que resultam em frequentes desconexões e particionamentos de rede. Além disso, os ambientes operacionais encontrados nas redes veiculares também são dinâmicos, já que existem cenários altamente densos (áreas urbanas centrais de grandes cidades) e áreas com tráfego escasso (áreas rurais, áreas urbanas periféricas e cidades de menor porte) (BENAMAR et al., 2014).

A exceção de alguns algoritmos, estratégias de roteamento baseadas na localização dos veículos e mapas digitais apresentam desempenho superior na maior parte dos cenários (KANG et al., 2015). Entretanto, elas consideram a existência de serviços externos de localização capazes de informar a posição do veículo de destino sempre que ela é necessária. Tanto os serviços de localização quanto as estratégias de roteamento assumem a existência de infraestruturas externas ao longo das vias, e que os veículos são capazes de manter comunicação permanente com elas (AHMED; KANG; KIM, 2015). Essas premissas são pouco realistas porque: (1) a instalação das infraestruturas ao longo de todas as vias é praticamente inviável devido ao seu alto custo; (2) a manutenção da conectividade entre os veículos, em constante movimento, e as infraestruturas é impraticável (XIA; YEO, 2014); (3) a densidade de rede varia ao longo do dia, impossibilitando que a rede esteja totalmente conectada a todo momento.

Sendo assim, é proposta uma estratégia de roteamento de mensagens integrada a um serviço de localização simplificado. O serviço de localização é baseado em técnicas DTN e capaz de estimar a localização do veículo de destino em cenários onde infraestruturas externas não estão disponíveis e a rede veicular não é totalmente conectada. A estratégia proposta busca, ainda, contemplar as principais métricas de desempenho das redes veiculares: taxa de entrega de mensagens; *overhead*³; e latência ou tempo médio de atraso de entrega das mensagens.

³O *overhead* reflete a quantidade de transmissões e mensagens redundantes necessárias para que uma mensagem seja entregue. Em outras palavras, reflete o custo adicional de transmissão em uma rede.

1.1 Objetivos

Nas áreas urbanas e em cidades de menor porte, onde a densidade veicular é menor, a informação sobre a localização dos veículos não encontra-se disponível, assim como não há infraestruturas externas ao longo de todas as vias. Neste contexto, tem-se como possibilidade a utilização e adaptação de técnicas do ambiente DTN que permitam prover, de maneira eficiente, o roteamento de mensagens entre os veículos.

Aplicações conhecidas, como DakNet (PENTLAND; FLETCHER; HASSON, 2004), ZebraNet (JUANG et al., 2002), Kiosknet (SETH et al., 2006) e DieselNet (BURGESS et al., 2006), baseiam-se no paradigma DTN e buscam superar os desafios impostos pela falta de infraestrutura de comunicação, no intuito de fornecer serviços e comunicação de dados. Essas aplicações são exemplos bem sucedidos, que embasam a ideia proposta nesta tese sobre a utilização de técnicas DTN dentro dos cenários veiculares – áreas urbanas distantes dos grandes centros e cidades de menor porte – onde a densidade de rede é menor e infraestruturas externas não estão disponíveis.

A partir dessas considerações, o presente trabalho tem por objetivo projetar e desenvolver um modelo computacional que, através de informações obtidas a partir do histórico de encontro entre os nós⁴, permita: (1) estimar e refinar ao longo do tempo a previsão sobre a localização dos veículos que trafegam por áreas urbanas com arquitetura veicular pura⁵; (2) definir, a partir dessa estimativa e refinamento, rotas de encaminhamento de mensagens dinâmicas e eficientes. Tem-se, como consequência dessas metas, os seguintes objetivos específicos:

1. Obter taxas de entrega de mensagens próximas ao ideal utilizando um baixo número de transmissões;
2. Produzir baixo *overhead* através da definição de rotas eficientes de encaminhamento de mensagens;
3. Alcançar um desempenho estável quando exposto a cenários que apresentam variação de diferentes fatores (parâmetros) de impacto.

Contudo, para que seja possível alcançar os objetivos propostos alguns desafios precisam ser superados.

⁴O histórico de encontros entre os nós é uma técnica conhecida e muito utilizada pelas principais estratégias de roteamento propostas para o ambiente DTN.

⁵Na arquitetura veicular pura ou veículo a veículo (V2V) os nós não fazem uso de infraestruturas externas para auxiliar a comunicação e transmissão de informações sobre rotas e veículos remotos.

1.2 Motivação e Desafios

As estratégias de roteamento baseadas na localização dos veículos e projetadas para redes veiculares ad hoc (VANET) pressupõem que, devido à alta densidade de automóveis, o ambiente veicular é totalmente interligado. Essa suposição tem por objetivo estabelecer conectividade fim a fim entre um nó de origem e outro de destino (LI; WANG, 2007). As estratégias de roteamento voltadas para redes veiculares tolerantes a atrasos (VDTN) buscam superar, utilizando paradigmas DTN, os desafios impostos pelos cenários onde a conectividade fim a fim não é possível devido a frequentes desconexões e particionamentos de rede (BENAMAR et al., 2014).

Portanto, além da complexidade em se obter a informação atualizada sobre a localização dos veículos, outros desafios relacionados ao roteamento de mensagens em redes veiculares também precisam ser considerados (KANG et al., 2015):

1. *Taxa de Entrega vs Transmissões*: com intuito de aumentar a taxa de entrega, as estratégias de roteamento adotam modelos baseados na replicação de mensagens, contendo alto número de transmissões. Essas abordagens consomem rapidamente os recursos de rede como, por exemplo, a capacidade de armazenamento dos nós, além de produzirem um alto *overhead*. Por isso, a criação de modelos de roteamento eficientes, capazes de obter altas taxas de entregas sem gerar elevado número de transmissões, torna-se uma tarefa desafiadora;
2. *Cenários vs Desempenho*: a heterogeneidade dos cenários que contemplam o ambiente veicular implica na variação de fatores como: densidade da rede, velocidade dos veículos, raio de alcance das antenas de transmissão e capacidade do *buffer* de armazenamento. Essa variação tem impacto direto sobre o funcionamento das estratégias de roteamento, provocando instabilidade em seu desempenho, devido à incapacidade de lidarem com essa oscilação. Neste contexto, torna-se necessário projetar estratégias de encaminhamento capazes de manter seu funcionamento equilibrado, ao mesmo tempo em que seu desempenho não sofre grande impacto quando determinados fatores se modificam.

A criação de um modelo de previsão sobre a localização dos veículos capaz de prover comunicação e roteamento de dados em redes veiculares V2V motivou o desenvolvimento da estratégia de roteamento proposta nesta tese de doutorado.

1.3 Contribuições

As contribuições advindas do desenvolvimento desta tese de doutorado são elencadas a seguir:

- elaborar um modelo matemático capaz de prever e refinar a informação sobre a localização dos veículos que compõem redes veiculares com arquitetura V2V;
- fornecer roteamento de dados em ambientes veiculares com arquitetura V2V;
- dar suporte para que serviços e aplicações possam funcionar adequadamente em áreas urbanas que não possuem infraestruturas externas para auxiliar a comunicação veicular;
- especificar detalhadamente o funcionamento do modelo proposto, utilizando-o como referência dentro de uma estratégia de roteamento que permita avaliá-lo (qualidades e deficiências);
- criar uma estratégia de roteamento, tendo como base o modelo de previsão proposto, capaz de fornecer taxas de entrega próximas ao ideal sem apresentar elevado número de transmissões e alto *overhead*.

Almejamos também que novos trabalhos, baseados em nossas contribuições (Capítulo 7), possam aprimorar o método de previsão e a estratégia de roteamento criados, possibilitando que áreas urbanas e cidades que não possuem infraestruturas externas tenham acesso a serviços e aplicações inovadoras de gestão de tráfego, segurança veicular e entretenimento.

1.4 Métodos e Práticas

A metodologia dedutiva foi escolhida no desenvolvimento desta tese de doutorado, tendo como sustentação a pesquisa e levantamento bibliográfico dos principais trabalhos relacionados e desenvolvidos nos últimos anos. De maneira conjunta, foram utilizados experimentos baseados em simulações, que permitiram comparar e analisar os resultados obtidos com os resultados de outras pesquisas publicadas em eventos internacionalmente reconhecidos.

O estado da arte de pesquisas voltadas a estratégias de roteamento em redes tolerantes a atrasos e desconexões e estratégias de roteamento, baseadas na localização dos

nós, em redes veiculares foi revisado. Essa abordagem permitiu compreender o funcionamento, tanto das estratégias de roteamento DTN, quanto das estratégias de roteamento VANET e VDTN, necessárias para que modelo de previsão tivesse sustentação teórica.

Por fim, ressalta-se, também, que foram consideradas, ao longo do desenvolvimento desta tese de doutorado, trabalhos de pesquisa que puderam ser aplicados em simulações que retratam cenários reais, como por exemplo o WDM (*Working Day Movement Model*) (EKMAN et al., 2008), onde os nós se movem de acordo com o mapa da área central da cidade de Helsinki na Finlândia, utilizado por questões de praticidade.

1.5 Organização do Documento

O restante desse documento encontra-se organizado da seguinte maneira. O Capítulo 2 apresenta, de forma resumida, as informações necessárias para que seja possível compreender adequadamente o funcionamento da arquitetura DTN. Essas informações incluem as principais características dos contatos e tipos de contatos que ocorrem entre os nós que compõem uma DTN, as principais aplicações desenvolvidas dentro desta área e, por fim, suas principais métricas de avaliação de desempenho. O Capítulo 3 apresenta, de forma resumida, as principais características e arquiteturas do ambiente veicular, dentre as quais tem-se: rede veicular ad hoc (VANET), rede veicular tolerantes a atrasos (VDTN) e arquiteturas veiculares. O Capítulo 4 apresenta vários modelos de mobilidade característicos do ambiente DTN e VANET, permitindo compreender a importância de escolher cenários com modelos de movimento adequados ao problema que deseja-se investigar, já que estes modelos influenciam diretamente os resultados obtidos durante as simulações. O Capítulo 5 apresenta uma revisão literária sobre as principais estratégias de roteamento DTN e estratégias de roteamento VANET/VDTN baseadas na localização dos veículos, dividindo-as de acordo com o ambiente para o qual foram projetadas e apresentando seu princípio de funcionamento e principais características. O Capítulo 6 propõe dois modelos de previsão e refinamento sobre a localização dos veículos baseado no histórico de encontro entre os nós. A partir dos modelos de previsão propostos são desenvolvidas e apresentadas duas estratégias de roteamento para rede veicular tolerante a atraso com arquitetura V2V. O Capítulo 7 apresenta os cenários, simulações e resultados obtidos, no intuito de validar o desempenho obtido pelas estratégias propostas. O Capítulo 8 apresenta uma análise conclusiva a partir dos resultados alcançados com o desenvolvimento da tese de doutorado, além de elencar os trabalhos futuros que serão efetuados tendo como base as contribuições advindas dos modelos desenvolvidos.

2 Redes Tolerantes a Atrasos e Desconexões

As redes DTN apresentam como características, conectividade intermitente, longos e variados atrasos e a alta taxa de erros (SCOTT K.; BURLEIGH, 2007). Ao analisar a arquitetura de rede mais bem sucedida atualmente, a Internet, é possível constatar que algumas condições importantes são necessárias para garantir seu funcionamento como, por exemplo, baixos atrasos e baixas taxas de erro. Neste contexto, observa-se que o ambiente DTN possui aspectos contrastantes quando comparado ao formato da arquitetura proposta pela Internet, baseada no protocolo IP (Internet Protocol), que garante as premissas fundamentais para sua grande aceitação e sucesso: conectividade contínua, baixa perda de pacotes e atraso razoavelmente pequeno (ZHANG, 2006).

Sendo assim, as Redes Tolerantes a Atrasos e Desconexões apresentam-se como um ambiente desafiador, onde propostas de funcionamento conhecidas, como a arquitetura da Internet, não se aplicam devido aos grandes atrasos nas transmissões de dados e as constantes desconexões entre os nós que compõem sua topologia (BURLEIGH et al., 2003). Esses atrasos são determinados, principalmente, pelo tempo de espera de cada nó e pelo atraso nas transmissões das mensagens. No caso das desconexões, elas ocorrem, normalmente, pela alta mobilidade dos nós, que gera alterações constantes na topologia da rede, por condições adversas de comunicação, e por economia de recursos, caso das redes de sensores sem fio, que interrompem a recepção e transmissão de dados¹ para poupar energia (ZHANG, 2006).

A arquitetura DTN é vista, na literatura (CROWCROFT et al., 2008), como uma arquitetura com características distintas da arquitetura proposta pela Internet, já que precisa operar em cenários desafiadores, como o cenário de uma Internet Interplanetária, para o qual foi proposta inicialmente (FALL, 2003). Devido essa característica, foi proposta uma arquitetura específica para Redes Tolerantes a Atrasos e Desconexões, chamada de DTN (*Delay and Disruption Tolerant Network*)(CERF et al., 2007).

¹As antenas de transmissão dos nós alternam entre momentos de atividade, para recebimento e transmissão de dados, e momentos de inatividade, com intuito de economizar energia.

A arquitetura DTN utiliza-se de técnicas de comutação de mensagens e armazenamento persistente como mecanismos para contornar os problemas de atrasos e desconexões (OLIVEIRA et al., 2008). Quando uma mensagem precisa ser enviada, esta é armazenada e encaminhada nó a nó desde sua origem até seu destino; por utilizar esse conceito, as DTNs são conhecidas como redes do tipo armazena-carrega-encaminha (*store-carry-and-forward*). Num primeiro momento a mensagem é recebida integralmente, armazenada e carregada para, num segundo momento, ser transmitida ao próximo nó, podendo este ser ou não o destino da mensagem (DEMMER et al., 2003). Na arquitetura DTN não há a necessidade de o destino estar ativo quando a origem enviar a mensagem.

A transmissão das mensagens, para as aplicações desenvolvidas dentro do ambiente DTN, deve ocorrer de forma assíncrona (CERF et al., 2001), ou seja, não deve-se esperar uma confirmação de recebimento para uma dada mensagem enviada, para que futuras transmissões sejam feitas (DURST R., 2002). Tal característica está atrelada ao fato de que, normalmente, os nós vizinhos² estão em constante movimento, isso faz com que o tempo disponível para transmissão e recepção de mensagens seja curto, não possibilitando aos nós efetuar a troca de muitas informações, muito menos esperar confirmações de recebimento como condição para o envio de novas mensagens (OLIVEIRA et al., 2007).

Os diversos contatos³ que ocorrem no ambiente DTN podem ser vistos como uma oportunidade onde os nós têm a possibilidade de se comunicar e efetuar transmissões de mensagens (CERF et al., 2007). Os contatos podem ser classificados de acordo com a sua previsibilidade, ou ainda, se alguma ação se faz necessária para que eles aconteçam. Uma análise mais detalhada sobre a arquitetura DTN é apresentada na seção 2.1.

2.1 Arquitetura DTN

A utilização de comutação de mensagens e armazenamento persistente tornaram-se técnicas necessárias dentro do ambiente DTN e para tal adotou-se como solução, pelo grupo de pesquisa em DTN (*DTN Research Group - DTNRG*), a criação de uma camada de agregação (*overlay*) situada acima da camada TCP e abaixo da camada de Aplicação que possibilita a interoperabilidade entre redes convencionais e DTNs (FALL, 2003).

A arquitetura em *overlay* permite tornar a DTN totalmente independente das diversas redes regionais que a compõem, permitindo que as aplicações se comuniquem

²São nós que encontram-se no raio de alcance da antena de transmissão de um determinado nó, permitindo que haja uma comunicação e consequente transmissão de mensagens entre os mesmos.

³Ocorrem quando dois nós encontram-se sobre o raio de alcance de transmissão um do outro.

através de múltiplas regiões. Para garantir interoperabilidade com qualquer tipo de rede, a camada de agregação é situada acima da camada de transporte das redes que se servem do perfil de protocolos TCP/IP. As camadas abaixo da camada de agregação são definidas de acordo com a conveniência do ambiente e comunicação de cada região, podendo ser específicas para cada região englobada pela DTN. A Figura 2.3 apresenta o formato da arquitetura DTN.

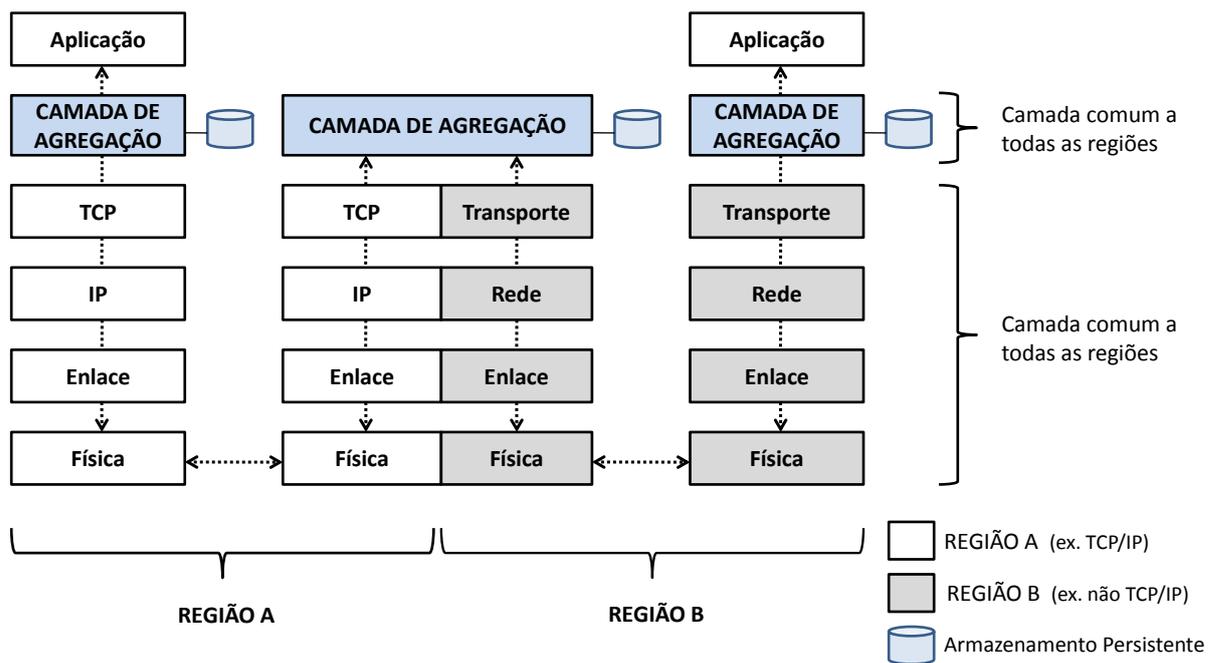


Figura 1: Arquitetura DTN.

Fonte: (FALL, 2003)

A metodologia adotada permite à arquitetura DTN atuar e superar as adversidades apresentadas por ambientes onde a conectividade para transmissão de dados, entre uma origem e um destino, não existe no momento em que deseja-se efetuar o envio de algum tipo de informação, e ainda, pode permanecer assim por tempo indeterminado, chegando até a nunca existir (JAIN; FALL; PATRA, 2004). Torna-se possível, também, através da arquitetura proposta, utilizar os recursos de armazenamento da rede para efetuar transmissão de mensagens baseada na técnica conhecida como *store-carry-and-forward* (SMALL; HAAS, 2005).

A arquitetura DTN engloba, ainda, alguns conceitos importantes, dentre os quais destacam-se: região e *gateways* (FALL, 2003). Considera-se como região, o agrupamento de nós (fixos ou móveis) que apresentam características relativamente homogêneas, para

qual a formação e número de nós participantes varia de acordo com a natureza do sistema (OLIVEIRA; DUARTE, 2009). Um *gateway* pode ser descrito como um nó móvel que possui a habilidade de participar de duas ou mais regiões, tal característica lhe permite ligá-las. Em outras palavras, ele serve como possível caminho para que a transmissão de dados entre as regiões envolvidas ocorra.

Portanto, para os cenários típicos de DTNs, verifica-se a existência de redes regionais, esse fato cria a necessidade de que poucos ou vários nós participem do processo de transmissão de uma mensagem, recebendo-a, armazenando-a e posteriormente repassando-a de acordo com a metodologia do protocolo de roteamento utilizado. A Figura 2 apresenta o conceito de redes regionais e o funcionamento da técnica de *store-carry-and-forward*:

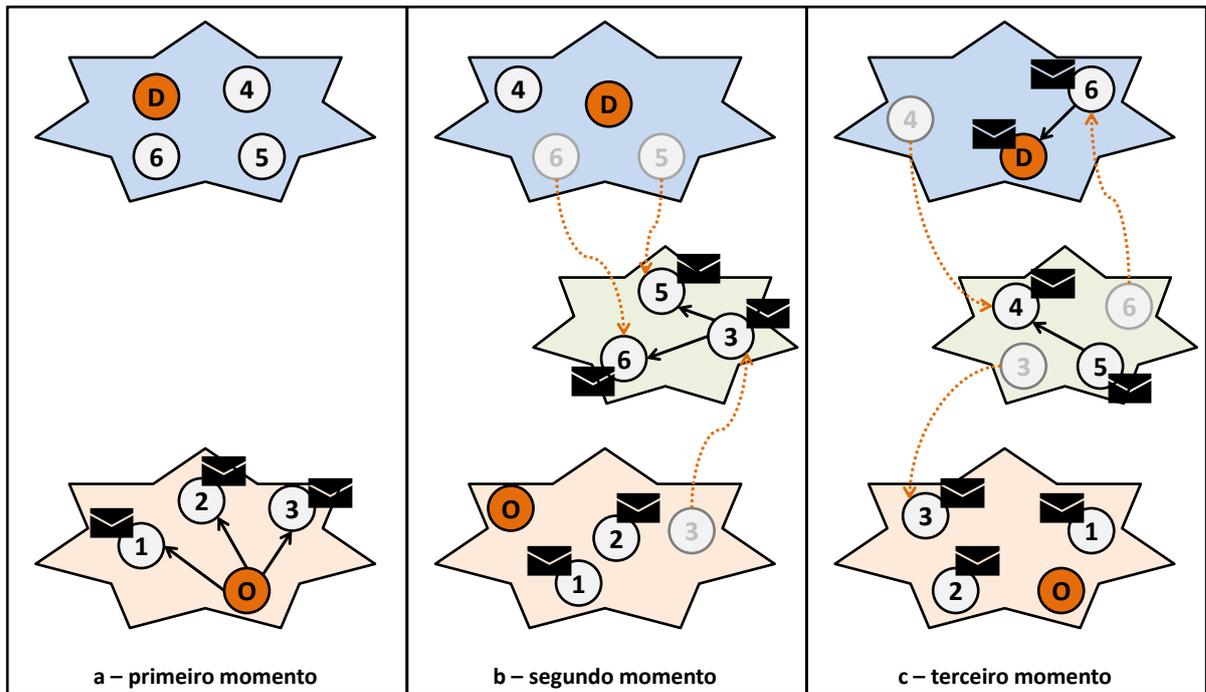


Figura 2: Redes Regionais - Técnica de *store-carry-and-forward*

Observando a Figura 2a pode-se verificar que existem duas regiões distintas, e aparentemente sem comunicação entre si. Na região inferior (em relação a Figura) tem-se um nó de origem **O**, encaminhando uma mensagem aos seus vizinhos diretos (1, 2 e 3), essas mensagens possuem como destino o nó **D**, localizado na região superior. Pela Figura 2b é possível verificar que, em algum momento posterior, os nós 5 e 6, pertencentes, até então, à região superior, deslocam-se para baixo. Já o nó 3, pertencente, até o momento, à região inferior, desloca-se para cima, formando uma terceira região central. Na Figura

2b, à região central já está formada, e a mensagem transmitida anteriormente pelo nó de origem **O** é encaminhada pelo nó 3 aos nós 5 e 6. Analisando a Figura 2c, é possível observar que o nó 6 volta a se deslocar para cima, no sentido da região superior, o que lhe faz encontrar com o nó de destino **D**, possibilitando que o roteamento da mensagem ocorra.

A dinâmica apresentada na Figura 2 permite identificar informações importantes relativas ao ambiente DTN, mais especificamente sobre a mobilidade dos nós que a compõem:

1. **A mobilidade e as desconexões:** a alta mobilidade dos nós gera, a todo momento, alterações na topologia da rede, o que produz constantes desconexões entre si. Essa característica torna árdua, por parte dos protocolos, a tarefa de rotear mensagens entre os nós que compõem uma DTN. Por exemplo: se no instante apresentado na Figura 2b o nó de origem **O** precisasse entregar uma mensagem ao nó 3, seu vizinho direto no momento ilustrado pela Figura 2a, isso já não seria mais possível, porque o nó 3 não faz mais parte da sua região. Em outras palavras, as rotas de entrega de mensagens são extremamente dinâmicas e alteram-se a todo momento, característica que exige dos protocolos de roteamento, a necessidade de determinar, a cada instante de tempo, uma nova rota de envio para as mensagens que estão sendo encaminhadas;
2. **A mobilidade e a criação de rotas:** ainda que a mobilidade gere incertezas sobre possíveis rotas de entrega das mensagens, ela permite, em contrapartida, que regiões distintas tenham a possibilidade de trocar informações, através dos nós que se deslocam entre elas. Sendo assim, o movimento constante dos nós torna-se uma informação importante, que deve ser analisada pelos protocolos de roteamento. A identificação e análise deste contexto, composto, por exemplo, pela localização dos nós, pelo sentido de deslocamento e pela velocidade com que se deslocam, é imprescindível para que, a todo instante, novas rotas de encaminhamento de mensagens sejam identificadas.

O ambiente DTN, devido à grande dinamicidade de seus nós, não permite que oportunidades de transmissão sejam perdidas, visto que, normalmente, não é possível prever, de maneira exata, quando um contato entre dois nós ocorrerá novamente, e se ele realmente ocorrerá. Isso leva à conclusão de que as oportunidades de transmissão devem ser sempre aproveitadas, ou ainda, que uma análise adequada sobre a mobilidade dos

nós deve ser efetuada, no intuito de estimar mais precisamente quais contatos apresentam maior possibilidade de entrega de uma mensagem, definindo aqueles que devem ser aproveitados para transmissão.

A análise dos contatos é necessária porque certas redes tolerantes a atrasos e desconexões estão sujeitas a restrições como bateria e armazenamento. Um bom exemplo são as redes de sensores, onde em determinados momentos os nós dormem para economizar bateria, ou seja, seus transceptores alternam entre momentos de escuta da rede, para recebimento e transmissão de dados e momentos de inatividade, onde as antenas são desligadas, economizando bateria (ANASTASI et al., 2009).

A seção 2.2 apresenta mais detalhadamente questões referentes aos contatos e tipos de contatos dentro do ambiente DTN.

2.2 Contatos e Tipos de Contatos

Na arquitetura TCP/IP, utilizada com sucesso pela Internet, assume-se, como requisito básico, que todos os nós da rede se encontram disponíveis e podem ser acessados a qualquer momento. Entretanto, para a arquitetura DTN, tal requisito não pode ser atendido, devido às constantes desconexões. Neste contexto, a comunicação e transmissão de informações entre os nós ocorre apenas no momento em que um contato entre estes acontece.

Quando uma mensagem precisa ser enviada ela é armazenada e encaminhada no nó a nó desde sua origem até seu destino. Essa característica faz com que as redes DTNs também sejam conhecidas como redes do tipo *store-carry-forward*, já que uma mensagem recebida é primeiramente armazenada para em seguida ser enviada ao próximo nó.

As aplicações DTNs enviam mensagens de tamanhos variáveis chamadas de unidades de dados da aplicação ou ADU (*Application Data Unit*). Elas são transformadas pela camada de agregação em uma ou mais unidades de dados, denominados agregados, que são armazenados e encaminhados pelos nós DTN.

Um contato corresponde a uma ocasião favorável para que dois nós possam trocar dados entre si. Dentro da arquitetura DTN os contatos podem ser classificados como: persistentes, sob demanda, programados, oportunistas e previsíveis (FALL, 2003), como apresentado nas seções a seguir.

2.2.1 Contatos Persistentes

Os contatos persistentes são aqueles que encontram-se sempre disponíveis, não necessitando de qualquer tipo de ação para que sejam instanciados. Conexões para Internet utilizando tecnologias com xDSL são um exemplo de contato persistente.

2.2.2 Contatos Sob Demanda

Os contatos sob demanda são aqueles que requerem algum tipo de ação para que sejam instanciados, e uma vez acionados funcionam como contatos persistentes até serem encerrados. Um exemplo de contato sob demanda são as redes de sensores que requerem o envio de uma mensagem específica para os transeptores dos nós sejam ativados.

2.2.3 Contatos Programados

Os contatos programados funcionam através de uma espécie de agendamento pré-estabelecido, no qual nós que desejam efetuar uma comunicação sabem, de alguma maneira, quando o contato ocorrerá. O tempo de duração do contato também pode ser estabelecido previamente. Uma exigência das redes de contatos programados é a sincronização do tempo entre os nós que a compõem, para que a troca de informações seja realizada com sucesso. Os contatos programados podem ser vistos em comunicações espaciais, onde é possível utilizar a previsibilidade do movimento dos corpos celestes para prever quando haverá uma janela de comunicação disponível.

2.2.4 Contatos Oportunistas

Os contatos oportunistas tiram proveito de encontros que não foram previamente programados entre nós, ou seja, eles ocorrem de forma não determinística e têm como objetivo obter vantagem de contatos realizados totalmente ao acaso, no intuito de realizar comunicação com qualquer nó que esteja fora do alcance de um outro nó fonte. Como exemplo de contatos oportunistas, temos as redes veiculares, VANET e VDTN, onde os veículos usam conexões oportunistas para troca de dados através de redes IEEE 802.11, tendo como intuito obter e compartilhar informações sobre as condições de tráfego.

2.2.5 Contatos Previsíveis

Os contatos previsíveis são aqueles para os quais é possível fazer previsões sobre horário e duração dos contatos com base em históricos de contatos previamente realizados. Em contrapartida aos contatos programados, os previsíveis possuem certo grau de incerteza sobre sua ocorrência.

2.3 Agregados e Transferência de Custódia

As mensagens originadas na arquitetura DTN são denominadas agregados e podem possuir diferentes tamanhos (SCOTT; BURLEIGH, 2007). Os agregados são compostos por uma sequência de blocos de dados de protocolo que são análogos aos cabeçalhos, porém com uma pequena diferença as informações de controle nem sempre estão localizadas no início dos dados (agregados).

Tratando-se de DTN, é possível que existam várias instâncias de um mesmo agregado distribuídas por diversas regiões da rede ou até em uma mesma região. Um nó DTN pode ser definido como uma entidade que executa uma instância do protocolo de agregação (*Bundle Protocol*), e é capaz de receber, armazenar e transmitir agregados (FARRELL et al., 2006).

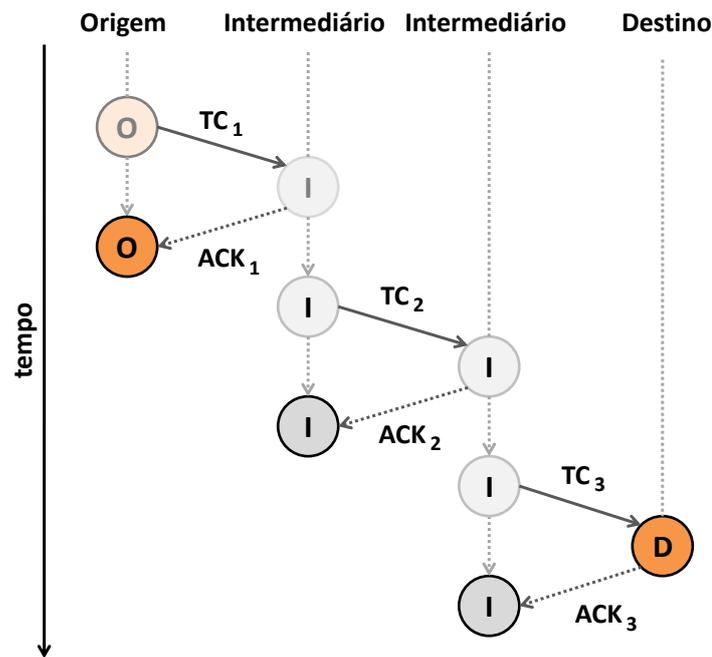
Utilizando-se do protocolo de agregação, em conjunto com os protocolos que operam nas camadas abaixo da camada de agregação, as DTNs efetuam retransmissões nó a nó, com intuito de superar situações adversas com perdas ou dados corrompidos. Entretanto, como os protocolos que operam abaixo da camada de agregação não são executados de modo fim a fim nas redes tolerantes a atraso e desconexão, os mecanismos que provêem confiabilidade fim a fim só podem ser implementados na camada de agregação (WARTHMAN, 2003).

A camada de agregação suporta a retransmissão nó a nó através de um mecanismo denominado Transferência de Custódia (TC), que tem como objetivo passar a responsabilidade da entrega de uma mensagem de um nó para outro. Para realização da transferência de custódia, um temporizador é utilizado pela camada de agregação em conjunto com retransmissões na implementação de um mecanismo de reconhecimento custódia a custódia.

No momento em que um nó DTN envia uma mensagem ao próximo nó, ele efetua uma solicitação de transferência de custódia e inicia um temporizador de retransmissão.

Se a camada de agregação do próximo salto aceitar essa solicitação é retornado um reconhecimento (mensagem *ACK*) para o nó que enviou a mensagem com o pedido de transferência de custódia. Contudo, se o reconhecimento (*ACK*) não for retornado antes de o temporizador expirar, o nó emissor reenvia o agregado. A Figura 3 apresenta o mecanismo de transferência de custódia.

Figura 3: Transferência de Custódia (TC).



A arquitetura DTN não exige que todos os nós DTN aceitem a transferência de custódia (OLIVEIRA, 2008). Ainda que um nó tenha capacidade de armazenamento suficiente para obter a custódia de um agregado, ele pode escolher não aceitar um pedido de transferência, pois outro fator como, por exemplo, uma limitação de bateria pode inviabilizar a operação.

Em DTN, um dos recursos mais disputados é o acesso ao armazenamento em cada nó. Ao contrário de muitas outras redes onde as mensagens são simplesmente descartadas no momento em que a memória acaba, um nó, sob a custódia de um agregado, só pode apagá-lo em duas situações: quando transfere a custódia do agregado para outro nó, ou se o tempo de vida do agregado expirar.

2.3.1 Opções de entrega

A arquitetura DTN define oito opções de entrega para os agregados, que são determinadas pela aplicação. No momento do envio de uma unidade de dados, a aplicação pode requisitar qualquer combinação das opções de entrega disponíveis. A informação sobre as opções requisitadas pela aplicação é levada juntamente com cada agregado produzido pela camada de agregação. Abaixo são apresentadas as oito opções de entrega disponíveis na arquitetura DTN:

- *pedido de transferência de custódia*: solicitação para que um agregado seja entregue utilizando procedimentos de transferência de custódia;
- *pedido de aceitação de custódia pelo nó fonte*: provê uma forma da aplicação exigir que o nó DTN fonte aceite a custódia dos agregados enviados (por exemplo, armazenamento de forma persistente dos agregados);
- *notificação de entrega dos agregados*: conhecida como aviso de recebimento (return receipt). Um aviso único enviado pelo nó destino para os nós que participam do encaminhamento do agregado, podendo chegar até o nó fonte (WARTHMAN, 2003);
- *notificação de reconhecimento positivo do agregado pela aplicação*: solicitação de um relatório sobre o estado do reconhecimento, similar ao relatório do estado de entrega do agregado, porém, é gerado pela camada de aplicação do destino e não pela camada de agregação do destino;
- *notificação de recepção do agregado*: é gerado sempre que um agregado é recebido por um nó DTN;
- *notificação de aceitação de custódia*: é gerado para os nós que solicitam a custódia do agregado, inclusive para o nó DTN fonte;
- *notificação de encaminhamento do agregado*: é gerado para os nós que encaminharam o agregado, inclusive para o nó DTN fonte;
- *notificação de apagamento do agregado*: é enviada quando um agregado é apagado do buffer de um nó DTN. O objetivo é informar o motivo pelo qual o descarte se deu.

As notificações/solicitações de relatórios sobre o estado de agregado podem resultar no aumento inaceitável do tráfego na rede, por isso a arquitetura DTN define que a

geração de relatórios seja obrigatória somente no caso de um agregado aceito sob custódia ser apagado.

2.3.2 Modelos de Disseminação

A arquitetura DTN possui, basicamente, dois modelos de disseminação de mensagens: a disseminação epidêmica e a disseminação probabilística. No modelo epidêmico todos os nós da rede enviam suas mensagens a todos os seus vizinhos diretos, não havendo qualquer análise sobre a real probabilidade destes vizinhos entregá-las aos seus destinos, muito menos algum tipo de preocupação com o consumo de recursos da rede. Em contrapartida, essa metodologia permite que as mensagens sejam replicadas rapidamente, atingindo em pouco tempo todos os nós da rede. Essa dinâmica acarreta no aumento da probabilidade de entrega das mensagens aos seus respectivos nós de destino. O exemplo clássico de estratégia de roteamento que faz uso do modelo de disseminação epidêmico é o *Epidemic* (VAHDAT; BECKER, 2000).

O modelo de disseminação probabilístico utiliza cálculos matemáticos baseados em informações de rede como, por exemplo, a quantidade de mensagens entregues e o número e frequência dos contatos, para determinar quais nós possuem maior probabilidade de entregar determinadas mensagens aos seus respectivos destinos. O modelo probabilístico, diferentemente do epidêmico, tem como objetivo utilizar de forma mais eficiente os recursos de rede disponíveis, não produzindo uma propagação indiscriminada, que provoca congestionamento e perda de mensagens pelo uso total de armazenamento disponível nos nós. As estratégias *MaxProp* (BURGESS et al., 2006) e o *PROPHET* (LINDGREN et al., 2011) são exemplos clássicos de protocolos de roteamento que fazem uso do modelo de disseminação probabilística.

2.4 Métricas de Avaliação em DTN

As Redes Tolerantes a Atraso e Desconexões são um ambiente desafiador no que diz respeito a comunicação e roteamento de mensagens. Ao analisar suas principais características é possível constatar que a não existência de uma infraestrutura que permita conexões para o envio de dados entre dois nós em regiões distintas torna, na maioria dos casos, o encaminhamento das mensagens uma tarefa complexa.

Contudo, a mobilidade constante dos nós e a conseqüente mudança na topologia da rede, ainda que se apresente como um fator dificultador, por desfazer conexões e

caminhos já conhecidos, pode ser vista como um mecanismo natural de criação de novas rotas, onde as mensagens podem trafegar da sua origem seu destino. Essas características e desafios tornaram as redes tolerantes a atrasos uma área de pesquisa abrangente, exigindo que métricas de avaliação fossem definidas e garantindo que uma análise adequada sobre o desempenho das estratégias de roteamento desenvolvidas pudesse ser efetuada.

Sendo assim, as métricas de avaliação mais utilizadas na literatura podem ser divididas em (BALASUBRAMANIAN; LEVINE; VENKATARAMANI, 2007):

- *Probabilidade de Entrega das Mensagens*: mede a quantidade de mensagens que foram corretamente entregues a todos os destinos;
- *Overhead*: reflete a quantidade de mensagens trocadas entre os nós da rede, ou ainda, a quantidade de transmissões iniciadas pelos nós; também pode ser expressa pelo número médio de cópias de cada mensagem gerado na rede, como em (MUSOLESI; HAILES; MASCOLO, 2005) e (NUNES; DOTTI, 2009). Como as redes DTN possuem poucos recursos, os protocolos de roteamento devem ser otimizados para alcançar um baixo *overhead*.
- *Atraso na Entrega das Mensagens*: mede o tempo médio desde a criação de uma mensagem até o momento da sua entrega ao destino. Normalmente essa medida considera somente as mensagens entregues ao destino (SPYROPOULOS; PSOUNIS; RAGHAVENDRA, 2008).

2.5 Considerações Finais

As Redes Tolerantes a Atrasos e Desconexões apresentam características peculiares como longos atrasos e constantes desconexões, as quais não permitem que a arquitetura TCP/IP, usada com grande sucesso no ambiente web, seja aplicada a esse tipo de rede. Esse paradigma levou ao estudo e desenvolvimento de uma nova arquitetura (DTN) baseada no TCP/IP, que foi agregada de uma nova camada, denominada de agregação ou *Bundle Layer*. A camada de agregação foi projetada para permitir que mensagens possam ser armazenadas e repassadas posteriormente, em um processo conhecido como *store-carry-and-forward*. Essa característica permite superar condições adversas do ambiente DTN, como a impossibilidade de enviar uma mensagem ao seu destino, em um dado momento, seja pela inexistência de uma rota que a leve até ele, ou ainda, por não haver conexões ativas que permitam sua transmissão.

A mobilidade dos nós, ainda que responsável pela grande quantidade de desconexões e pela impossibilidade de que rotas sejam definidas e persistam por um determinado tempo, permite que as mensagens sejam transportadas entre sub-redes. Em outras palavras, os nós operam como agentes, promovendo o roteamento dessas mensagens. Essa característica resulta em um encaminhamento salto-a-salto, partindo de um nó origem, passando por nós intermediários e chegando até um nó destino. Entretanto, a metodologia utilizada para que esse encaminhamento aconteça de maneira eficiente é responsabilidade das estratégias de roteamento projetadas para o ambiente DTN. Neste contexto, o projeto e desenvolvimento de estratégias de roteamento para redes tolerantes a atrasos e desconexões torna-se um objeto de estudo importante. Isso está relacionado, principalmente, ao fato de possibilitarem que obstáculos como a comunicação intermitente sejam superados através do aumento do número médio de mensagens entregues, e da diminuição dos tempos de atraso.

Portanto o conceito proposto pela arquitetura DTN pode ser aplicado em diversas áreas de pesquisa, tais como: rede de sensores, monitoramento de animais silvestres e Internet interplanetária. Recentemente, técnicas típicas da arquitetura DTN (*store-carry-and-forward*) estão sendo utilizadas no ambiente das redes ad hoc veiculares ou VANETs. Elas mostram-se necessárias porque garantem que as mensagens geradas pelos veículos possam ser encaminhadas mesmo quando conexões fim a fim não estão disponíveis. A aplicação da abordagem DTN dentro do ambiente veicular levou à criação de um novo paradigma de pesquisa, que combina os desafios e técnicas encontrados nas redes veiculares ad hoc e nas redes tolerantes a atrasos e desconexões. A tese de doutorado proposta possui seu foco neste novo paradigma de pesquisa.

3 Redes Veiculares

As redes veiculares possuem papel importante no sucesso da próxima geração de arquiteturas computacionais inteligentes, como ITS e *Smart Cities*¹. Essas arquiteturas são compostas por sensores em rede, veículos inteligentes e pessoas com dispositivos portáteis, formando um conjunto de nós com recursos heterogêneos e funções variadas. Os sensores possuem como função sentir o ambiente e enviar os dados coletados para os nós de retransmissão. Aos nós de retransmissão cabe a tarefa de rotear essas informações até algum destino ou ponto de conexão com a Internet (BENAMAR et al., 2014).

O aumento da disponibilidade de aplicações e serviços para o ambiente veicular tem elevado o número de trabalhos de pesquisas voltados para questões que envolvem comunicação neste ambiente. Esses sistemas baseados na comunicação veicular têm como objetivo melhorar a segurança rodoviária e proporcionar mais conforto aos condutores dos veículos, onde carros equipados são capazes de trocar informações sobre o tráfego e a segurança rodoviária com outros veículos localizados na sua proximidade (AHMED; KANG; KIM, 2015).

As redes veiculares tornaram-se um tema de pesquisa popular pelo fato de que aplicações importantes podem ser construídas dentro desse ambiente. Nas redes veiculares, mensagens entre os veículos podem ser usadas para detectar diferentes níveis de engarrafamento (TERROSO-SAENZ et al., 2012), o que possibilita que o congestionamento do tráfego seja reduzido, tal benefício torna-se possível através da comunicação *veículo a veículo* (V2V) (KNORR et al., 2012). As aplicações desenvolvidas para o ambiente veicular podem ser classificadas em três categorias: (1) aplicações de segurança rodoviária, (2) aplicações de gerência e eficiência de tráfego, e (3) aplicações de informação, lazer e entretenimento (KARAGIANNIS et al., 2011).

A comunicação entre os veículos possui papel fundamental para que os sistemas e aplicativos desenvolvidos atinjam seus objetivos. Entretanto, praticamente todos os

¹As Cidades Inteligentes utilizam tecnologias de comunicação e informação com intuito de prover sustentabilidade e melhoria nas condições sócio-econômicas dos municípios.

automóveis estão em constante movimento, o que torna a topologia da rede extremamente dinâmica já que ela está mudando constantemente. A alta velocidade e mobilidade dos veículos fazem com que os intervalos de comunicação entre eles sejam curtos, resultando em frequentes desconexões. Além disso, os ambientes operacionais também se modificam, já que existem rodovias altamente densas e áreas com tráfego escasso (BENAMAR et al., 2014).

3.1 Redes Veiculares Ad hoc — VANETs

As Redes Veiculares Ad hoc² ou VANETs são um tipo de rede ad hoc móvel que fornecem comunicação *veículo a veículo* (V2V) ou *veículo a infraestrutura* (V2I). Elas suportam uma quantidade inumerável de aplicações destinadas a veículos, motoristas, passageiros e pedestres, que vão desde a segurança no trânsito até o info-entretenimento. As VANETs são um elemento central para a próxima geração de sistemas de transporte inteligente (ITS), sendo compostas por veículos equipados com rádio transmissor/receptor, que operam como nós móveis, e também por infraestruturas que atuam como nós fixos.

Apesar de possuir muitas similaridades com outras redes ad hoc, dentre as quais destacam-se: raio de transmissão curto, auto-organização, auto-gerenciamento e baixa taxa de transmissão, as VANETs podem ser distinguidas de outros tipos de redes ad hoc através dos seguintes critérios (LI; WANG, 2007):

- *Topologia de rede altamente dinâmica*: a topologia de rede das VANETs varia com o movimento dos veículos. Considerando a especificação 801.11p, o link de comunicação pode ser estabelecido entre veículos dentro de um raio efetivo de 400 metros, sendo desconectado quando os veículos saem do mesmo. Neste contexto, quando dois veículos movem-se em direções opostas, por exemplo, a conectividade da rede muda rapidamente. Portanto, pelo fato dos veículos atuarem como nós de comunicação móveis, a topologia de redes veiculares é altamente dinâmica;
- *Densidade não-uniforme de veículos*: as VANETs são usualmente utilizadas em dois cenários típicos, rodovias e áreas urbanas. Nas rodovias, o ambiente é relativamente simples e direto, visto que os veículos movem-se apenas em duas direções ao longo da via. Já nas áreas urbanas tem-se um ambiente mais complexo e heterogêneo, onde os veículos podem mudar de direção constantemente (cruzamentos) e a densidade

²Uma rede ad hoc permite que dispositivos móveis tenham a possibilidade de formar uma rede em áreas onde não há uma infraestrutura pré-definida de comunicação.

de rede é variável – alta durante o dia, especificamente na hora do *rush* e muito baixa durante noite;

- *Energia e Recursos suficientes*: para as redes DTN móveis, como as MANETs, restrições como: energia e poder de processamento são questões centrais que precisam ser tratadas pelas estratégias de roteamento. Contudo, nas VANETs, a energia é um recurso disponível e ilimitado, visto que o motor do veículo oferece uma potência contínua para dispositivos de comunicação, GPS entre outros. Os veículos também possuem, normalmente, dispositivos eletrônicos como mapa digital e sensor de inércia que permitem obter sua localização, velocidade e direção de deslocamento. Eles podem, ainda, ser equipados com um chip integrado de alto desempenho para oferecer grande poder de processamento e capacidade de armazenamento.
- *Previsibilidade sobre a rota veicular*: os veículos têm sido equipados com dispositivos de sistemas de satélite para navegação global (GNSS), como o receptor de sistema de posicionamento global (GPS). Informação sobre a posição atual pode ser obtida do receptor GPS em quase todas as circunstâncias, com exceção de situações específicas como dentro de um túnel. Nós veiculares são também usualmente limitados por rodovias, estradas e ruas; se a velocidade, posição e o mapas das ruas são conhecidos, então a rota do veículo pode ser prevista de acordo com o modelo de mobilidade.

Devido a essas características, muitas estratégias de roteamento tradicionais não se aplicam ao ambiente VANET. Os algoritmos de roteamento destinados a redes veiculares devem ser projetados levando-se em consideração as mudanças na forma e no tamanho da rede provocadas pela alta mobilidade dos seus nós. Uma das questões críticas deste tipo de rede é o período de tempo relativamente curto que um nó que pode residir nela. A informação transmitida dentro das VANETs precisa ser roteada de maneira multi-salto para uma direção em particular ou destino específico, ao mesmo tempo em que a topologia da rede muda. Sendo assim, torna-se necessário que as estratégias de roteamento sejam capazes de tirar proveito da rápida presença de um veículo dentro da rede, identificando sua potencialidade de encaminhamento e utilizando-o para rotar as mensagens que permitirão que as aplicações projetadas para o ambiente veicular funcionem adequadamente.

3.1.1 Componentes e Funcionamento

A rede veicular ad hoc é um sistema complexo (Figura 4) que pode ser descrito em três camadas: uma camada de sensor, uma camada de comunicação, e uma camada

de processamento de dados. A camada de sensor considera o veículo como um grande sensor nó móvel, equipado com um dispositivo eletrônico que possui alta capacidade de sentir o ambiente ao se redor, obter dados de tráfego, localização do veículo, velocidade, direção, efetuar comunicação e processar dados. Esse dispositivo é denominado unidade de bordo (OBU). Uma unidade de acostamento é uma infraestrutura fixa, que pode ajudar a encaminhar a mensagem, facilitando uma comunicação confiável, também com conhecida como RSU. O GNSS pode oferecer posição e sincronização de tempo para o veículo como, por exemplo, o GPS.

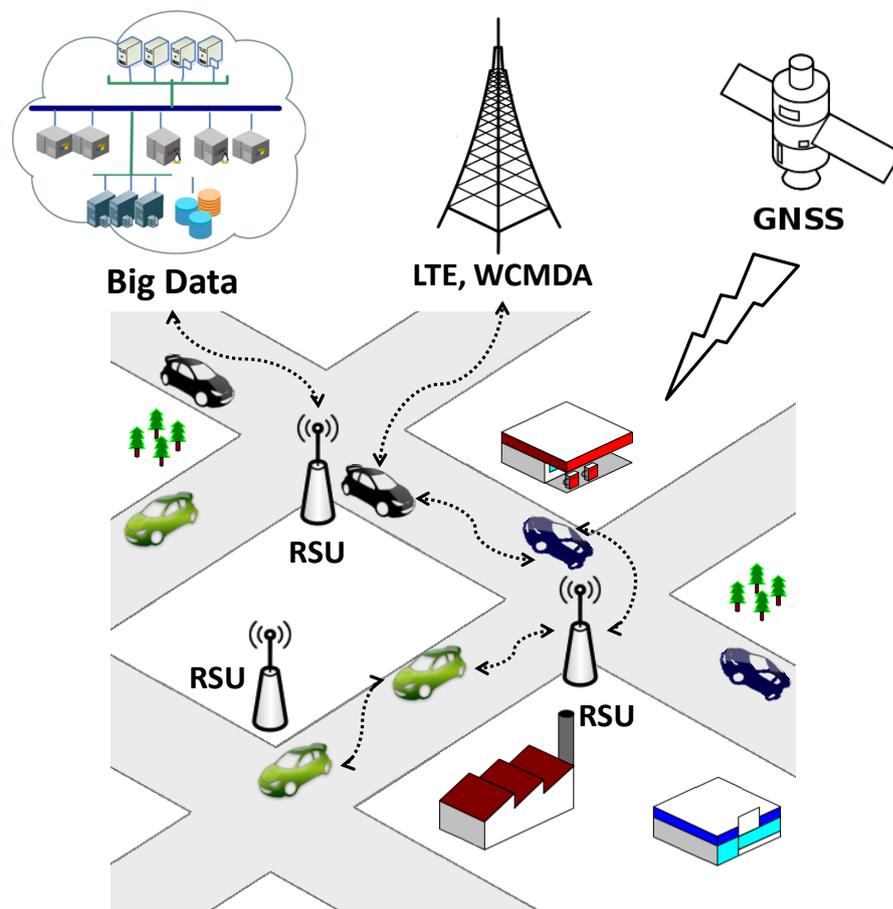


Figura 4: Componentes e Funcionamento – VANET.

Fonte: (LIU et al., 2016)

A VANET usa veículos como nós móveis dentro de uma MANET para criar uma rede móvel, ela transforma cada veículo participante em um roteador sem fio ou nó, permitindo que veículos num raio de aproximadamente 100 metros (em ambiente real) possam se conectar e, por sua vez, criar uma rede de grande área. Contudo, devido à mobilidade, alguns veículos ultrapassam os limites do sinal de alcance e acabam saindo da rede, ao mesmo tempo que outros entram nesse limite de alcance e juntam-se à rede,

conectando-se uns aos outros de modo que a rede móvel é criada. Uma VANET inclui principalmente a comunicação V2V e a comunicação V2I, podendo ser usada em aplicações de segurança, informação e entretenimento.

3.1.2 Padrões de Comunicação Veicular

O padrão de comunicação sem fio IEEE 802.11p teve sua origem nos Estados Unidos, através da alocação do espectro de banda para comunicações de curto alcance dedicado (DSRC) e dos esforços para definir a tecnologia para manipular esta banda. O grupo de trabalho IEEE 1609 também definiu vários projetos de normas (1609.1, 1609.2, 1609.3, 1609.4 e 1609.11) com base no IEEE 802.11p, que juntamente com os padrões IEEE 1609.x fornecem um acesso sem fio completo através de uma pilha de protocolos, para o ambiente veicular, denominada WAVE (*Wireless Access in Vehicular Environments*).

O padrão WAVE pode ser dividido em duas abordagens (UZCáTEGUI; ACOSTA-MARUM, 2009): *Road Side Unit – RSU* que são instaladas em postes de iluminação, semáforos, sinais de trânsito, entre outros; e *Onboard Unit – OBU* que são instaladas em veículos tais como carros, motos, caminhões e ônibus. As duas abordagens deste padrão funcionam de forma independente, onde os veículos são capazes de se organizar em sub redes chamadas de WBSS (*WAVE Basic Service Set*). Essas sub redes podem ser formadas apenas por OBUs, ou por OBUs operando em conjunto com RSUs, como apresentado na Figura 5.

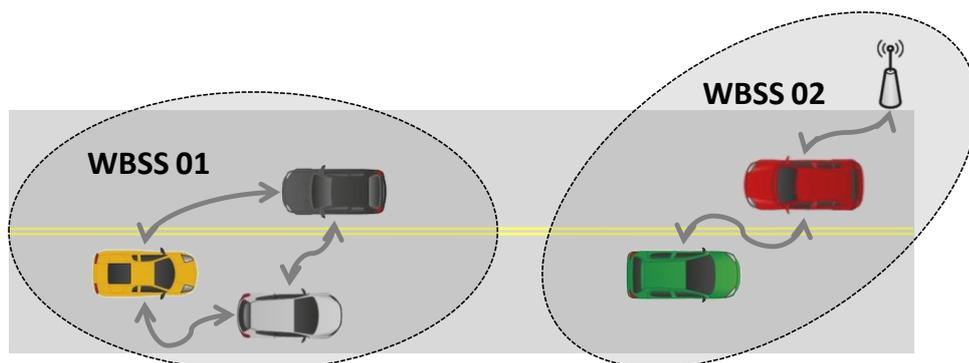


Figura 5: Comunicação Padrão WAVE – WBSS 01: formada apenas por OBUs; WBSS 02: formada por OBUs e RSU.

Fonte: (UZCáTEGUI; ACOSTA-MARUM, 2009) – adaptado.

Os membros de um determinado WBSS trocam informações por meio de alguns canais de serviço (SCH) e de controle (CCH). Porém, pacotes de Internet Protocol (IP) são permitidos apenas no canal SCH e os veículos devem ser membros da mesma WBSS.

A principal alteração, proposta pelo WAVE, é permitir que veículos transmitam e recebam sem a necessidade de pertencer a um BSS (*Basic Service Set*). Em outras palavras, os veículos são capazes de se comunicar diretamente um com o outro após um determinado tempo de contato, sem qualquer sobrecarga adicional, já que operam no mesmo canal (JIANG; DELGROSSI, 2008). A arquitetura WAVE é apresentada na Figura 6.

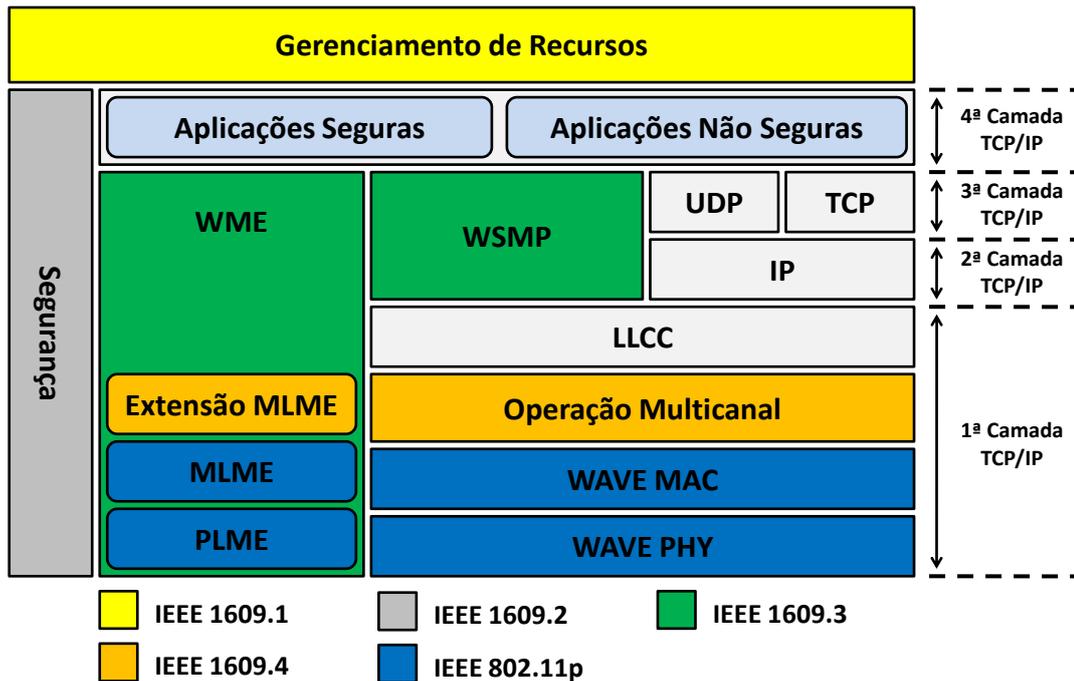


Figura 6: Pilha de Protocolos WAVE.

- IEEE 1609.1: descreve a aplicação em uma OBU com recursos limitados que pode utilizar, remotamente, recursos de processamento de outras entidades de maneira transparente (IEEE-1609.1, 2006).
- IEEE 1609.2: especifica os conceitos de segurança WAVE, definindo os formatos de segurança e processamento para as mensagens; especifica, também, as circunstâncias em que as trocas de mensagens seguras são necessárias (IEEE-1609.2, 2012);
- IEEE 1609.3: Fornece serviços de roteamento e endereçamento necessários na camada de rede WAVE; o *WAVE Short Message Protocol* (WSMP) facilita o roteamento por meio do provimento de grupos de endereços para aplicações de segurança. Além disso, utiliza ambos os canais de controle (CCH) e de serviço (SCH) (IEEE-1609.3, 2012);

- IEEE 1609.4: dá suporte para um canal de controle e múltiplos canais de serviço, fornecendo operação multicanal para comunicação veicular (IEEE-1609.4, 2010);
- IEEE 1609.11: protocolo de troca de dados “*Over-the-Air*” para Sistemas Inteligentes de Transporte, ele define os serviços e os formatos de pagamentos (IEEE-1609.11, 2010);
- IEEE 1609.12: indica os valores e identificadores que foram atribuídos para utilização dos sistemas WAVE, incluindo as atribuições para Identificador do Serviço e do Fornecedor, compatíveis com as normas ISO, CEN e ETSI (IEEE-1609.12, 2012);

A Comissão Federal de Comunicações (FFC) alocou 75 MHz de largura de banda operando a 5.9 GHz, que faz uso de uma modulação *OFDM* para comunicações de curto alcance *V2V* e *V2I*.

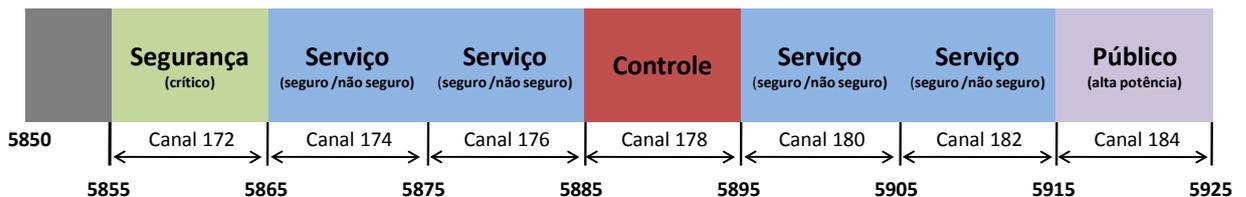


Figura 7: Comunicação Dedicada de Curto Alcance – DSRC.

Conforme ilustrado na Figura 7, o espectro DSRC é dividido em sete canais de 10 MHz. O canal 178 é o canal de controle (CCH), sendo restrito apenas às comunicações de segurança. Os dois canais de cada extremidade são reservados para usos especiais. Os canais restantes são canais de serviço (SCH), disponíveis para outros tipos de aplicações. Em outras palavras, o padrão IEEE 802.11p especifica os recursos físicos necessários para permitir que o IEEE 802.11 funcione em um ambiente veicular.

3.2 Redes Veiculares Tolerantes a Atrasos — VDTNs

Nas redes veiculares a comunicação entre veículos ocorre de maneira análoga à abordagem proposta pelas redes móveis ad hoc ou MANET, visto que as MANETs também não dispõem de infraestruturas fixas. As MANETs abrangem requisitos e protocolos de comunicação para uma vasta gama de aplicações, que vão desde redes de sensores até sistemas veiculares. Contudo, as VANETs apresentam cenários bem distintos, devido à dinamicidade da topologia da rede, que pode ser totalmente conectada, contendo um

alto volume de tráfego, ou parcialmente conectada, quando o volume de tráfego é muito baixo (WISITPONGPHAN et al., 2007).

Neste contexto, as redes veiculares podem ser divididas, de acordo com a sua topologia, em duas categorias diferentes: 1) redes veiculares totalmente conectadas ou redes veiculares ad hoc (VANET); 2) redes veiculares parcialmente conectadas ou redes veiculares tolerantes a atrasos e desconexões (VDTN). Nas VDTNs, onde o tráfego de veículos é escasso, técnicas e algoritmos de roteamento propostos para as redes tolerantes a atraso e desconexões (DTN) podem ser aplicados. Em outras palavras, as redes veiculares tolerantes a atrasos são um caso especial de Redes Veiculares Ad-hoc ou VANETs quando o paradigma DTN é usado para resolver problemas tais como: freqüentes desconexões e particionamentos de rede (KANG et al., 2015).

As redes tolerantes a atrasos foram projetadas, inicialmente, para servir de suporte as redes interplanetárias, tendo como principais características as constantes interrupções e os longos atrasos (FALL, 2003). Devido às suas características peculiares, as DTNs utilizam um modelo de encaminhamento de mensagens denominado store-carry-and-forward ou *armazena-transporta-e-encaminha*. Neste modelo, os nós assumem a custódia de uma mensagem até que outro nó, com melhores condições de entrega seja encontrado (esteja em contato), e então a mensagem seja encaminhada para ele, ou até que a mensagem possa ser entregue diretamente ao seu destino.

Os contatos, em redes tolerantes a atrasos e desconexões, são uma janela de oportunidade que possibilita o estabelecimento de conexões entre dois nós. Essa janela, ou intervalo de tempo, pode ser extremamente curta como no caso das redes veiculares, onde os carros se aproximam um do outro e precisam trocar informações e transmitir mensagens antes que a conexão seja interrompida e o contato se encerre. Devido à conectividade intermitente a mensagem pode demorar muito tempo para viajar de uma determinada origem até seu destino. Por esse motivo o armazenamento persistente torna-se necessário, e os nós carregam as mensagens até que oportunidades de retransmissão ocorram e as mensagens possam ser encaminhadas.

3.2.1 DTN x VDTN

As redes veiculares tolerantes a atrasos e desconexões possuem características advindas tanto das DTNs quanto das VANETs. Essa peculiaridade cria desafios que precisam ser superados durante a concepção das estratégias de roteamento projetadas para esse tipo de rede. Além disso, os conceitos e técnicas já conhecidas do ambiente DTN

necessitam de aprimoramentos antes que possam ser aplicados às VDTNs. Esse desafio de adaptar e aprimorar essas metodologias tem motivado novas pesquisas voltadas às redes veiculares tolerantes a atrasos e desconexões. Alguns desses requisitos são apresentados e discutidos a seguir (BENAMAR et al., 2014):

1. *Aplicações Veiculares*: algumas aplicações voltadas à segurança veicular possuem grandes restrições quanto ao tempo de atraso como, por exemplo, serviços de alerta aos motoristas em caso de parada (frenagem) de emergência. Além disso, esse tipo de informação não precisa ser propagada para veículos que encontram-se distantes do nó que emitiu o alerta. Para essa categoria de aplicações, os conceitos DTN não apresentam, normalmente, resultados ideais sendo que alguns deles sequer são aplicáveis ao cenário VDTN. Em contrapartida, outras aplicações não possuem requisitos de atraso rigorosos, sendo possível aplicar os princípios de DTN como, por exemplo, um serviço de manutenção veicular, que pode capturar os dados dos sensores do carro e transmiti-los a uma concessionária, ou ainda, um aplicativo de descoberta de vagas que pode determinar o melhor local para o motorista estacionar seu veículo;
2. *Desconexões Frequentes*: a alta mobilidade e velocidade dos veículos e o curto intervalo de comunicação entre eles resultam em frequentes desconexões. Num cenário onde dois carros trafegam em direções opostas a uma velocidade 100 Km/h, a janela de oportunidade de comunicação é de apenas alguns segundos, ocorrendo a desconexão após esse tempo. Se considerarmos ainda a densidade da rede, as desconexões tendem a aumentar quando a densidade da rede diminui, como é o caso das VDTNs. Estas características fazem com que os conceitos DTN sejam atraentes em redes veiculares parcialmente conectadas, já que foram projetados para lidar com esse tipo de condição;
3. *Conhecimento Geográfico*: veículos equipados com dispositivos *GPS* são cada vez mais comuns atualmente, permitindo obter a localização geográfica dos veículos e, em alguns casos, prever suas trajetórias. Essas informações permitem que as estratégias de roteamento otimizem sua metodologia de encaminhamento e alcancem desempenhos mais próximos do ideal. Além disso, aplicações voltadas ao ambiente veicular podem utilizar um novo paradigma de entrega baseado na localização dos veículos, onde as mensagens são encaminhadas para veículos localizados perto ou se movendo em direção a uma determinada localização. Essa abordagem permite que serviços de informação ao usuário, tais como: presença de gelo na estrada, acidente

na via e engarrafamento sejam desenvolvidos;

4. *Mobilidade e Previsão*: através de informações características do ambiente veicular, tais como: localização do veículo num dado momento, velocidade de deslocamento e trajetória condicionada ao mapa e sentido das vias (obtidas a partir de sistemas de posicionamento global e mapas digitais), torna-se possível a concepção de modelos matemáticos capazes de prever a localização futura dos veículos. Em outras palavras, modelos inteligentes de previsão podem auxiliar as estratégias de roteamento no processo de encaminhamento das mensagens. Informações complementares como, por exemplo, congestionamento e densidade de veículos, também podem ser consideradas durante a concepção desses modelos.

3.2.2 VANET x VDTN

As redes veiculares ad hoc são caracterizadas, principalmente, pela alta mobilidade dos seus nós e conseqüente conectividade intermitente. Neste contexto, a comunicação e transmissão de dados no ambiente veicular (veículo a veículo – V2V e veículo a infraestrutura – V2I) torna-se instável, visto que o constante movimento dos nós provoca frequentes desconexões. Além disso as VANETs apresentam cenários (bairros distantes do centro em grandes metrópoles, cidades de menor porte, períodos de início e final do dia) onde a densidade veicular diminui, tornando a rede parcialmente conectada e impossibilitando que rotas fim a fim sejam definidas. Esses mesmos desafios têm sido pesquisados desde o surgimento das redes tolerantes a atrasos e desconexões, permitindo que muitos paradigmas do ambiente de DTN sejam utilizados pelas redes veiculares, no intuito de solver os problemas gerados pelas constantes desconexões e frequentes particionamentos de rede.

Nas redes veiculares tolerantes a atrasos, os veículos armazenam e transportam as mensagens até que outros nós, com melhores condições de entrega, sejam encontrados e as mensagens sejam encaminhadas. Essa abordagem, *armazena-transporta-e-encaminha*, ocorre em contrapartida à metodologia utilizada pela VANET (*armazena-e-encaminha*), onde os nós não transportam as mensagens, mas sim as encaminham logo após receberem-nas de outros veículos. Essa abordagem é usada porque para as VANETs a rede é totalmente conectada, sendo possível definir, no momento em que o roteamento de uma mensagem será iniciado, um caminho fim a fim entre um veículo de origem e outro de destino (AL-SULTAN et al., 2014).

Sendo assim, as estratégias de roteamento convencionais projetados para VA-

NETs pressupõem que o ambiente veicular é totalmente interligado, tendo como objetivo estabelecer conectividade fim-a-fim entre os nós da rede (LI; WANG, 2007). Por outro lado, essas estratégias não podem ser utilizado quando o tráfego de veículos diminui e a conectividade fim-a-fim através de nós intermediários não pode mais ser estabelecidas (KURHINEN; JANATUINEN, 2008), componente fundamental para que os algoritmos de roteamento VANET possam operar adequadamente. Esse paradigma, das redes veiculares ad hoc, faz com que as estratégias de roteamento propostas para o seu ambiente falhem ao tentar entregar mensagens em cenários onde o tráfego veicular é escasso, como no caso das redes veiculares parcialmente conectadas.

3.2.3 Desafios do Ambiente VDTN

Embora muitos trabalhos tenham sido propostos tendo como foco o encaminhamento de mensagens dentro das redes veiculares tolerantes a atrasos, ainda existe uma gama de requisitos fundamentais que precisam ser contemplados pelas estratégias de roteamento VDTN. Esses requisitos possuem influência direta no desempenho dessas estratégias, principalmente porque a maioria dos algoritmos de encaminhamento pressupõem cenários de operação pouco condizentes com os ambientes veiculares reais. Dentre os requisitos, ainda carentes de estudos mais elaborados, destacam-se, em ordem de importância (KANG et al., 2015):

3.2.3.1 Obtenção da Localização dos Nós

A informação sobre a localização dos nós é utilizada por praticamente todas as estratégias de roteamento projetadas para redes veiculares e que possuem relevância dentro da literatura. O uso da localização dos veículos justifica-se porque os modelos de roteamento baseados nessa informação são considerados uma fonte de estudo promissora para que os principais desafios do ambiente veicular possam ser superados (BENAMAR et al., 2014). Em contrapartida, o processo de aquisição da informação sobre a localização de um veículo torna-se requisito fundamental para aplicabilidade desses modelos, entretanto, obter essa informação não é uma tarefa trivial quando os nós são móveis, característica do ambiente VDTN.

Embora muitas estratégias de roteamento veiculares utilizem a localização dos veículos como principal parâmetro para determinar como o encaminhamento das mensagens deve ocorrer, elas pressupõem que essa informação encontra-se disponível a todos os veículos da rede sempre que necessária. Em outras palavras, as estratégias consideram a

existência de um serviço global de localização capaz de informar os nós (em tempo real e a todo momento) sobre a posição de qualquer outro veículo – essa suposição mostra-se pouco realista. O funcionamento desse serviço global e o mecanismo utilizado para ter acesso ao mesmo não é discutido ou é deixado, na maioria das vezes, a cargo de infraestruturas externas como unidade de acostamento (LIU et al., 2016).

3.2.3.2 Funcionamento Baseado nas Unidades de Acostamento

As unidades de acostamento ou *RSU* são infraestruturas externas instaladas ao longo das vias para dar suporte à comunicação em redes veiculares. As *RSUs* possibilitam, aos nós efetuarem, além da comunicação *veículo a veículo* (V2V), comunicações *veículo a infraestrutura* (V2I). Essa abordagem permite que informações remotas possam ser obtidas através de serviços que podem estar conectados à Internet. Neste contexto, as estratégias de roteamento projetadas para o ambiente VDTN assumem que as *RSUs* encontram-se disponíveis ao longo de toda a malha rodoviária e, sendo assim, podem dar suporte à comunicação veicular a todo momento.

Entretanto, devido ao seu custo de instalação, esse tipo de infraestrutura externa está disponível apenas em áreas restritas da malha rodoviária. Em outras palavras, estratégias de roteamento de mensagens que possuem o funcionamento baseado em unidades laterais e outros tipos de infraestruturas externas tornam-se inoperantes, ou têm seu desempenho afetado negativamente, quando são executadas em ambientes reais onde esses recursos não estão presentes. Portanto, as estratégias de roteamento projetadas para o ambiente veicular devem ser capazes de operar de maneira híbrida, ou seja, tanto em cenários que dispõem de unidades laterais, quanto em cenários onde elas estão indisponíveis.

3.2.3.3 Consumo de Recursos *vs* Taxa de Entrega

O *Tradeoff*³ envolvendo o consumo de recursos de rede (normalmente vinculado ao mecanismo de replicação de mensagens) e o aumento na taxa de entrega é um desafio constante a ser superado pelas estratégias de roteamento voltadas aos ambientes tolerantes a atrasos e desconexões. Em sua maioria, algoritmos de encaminhamento projetados para DTN fazem uso da replicação como estratégia para otimizar sua capacidade em entregar mensagens e diminuir o tempo médio de atraso.

³situação computacional na qual há um conflito de escolha, quando uma ação tomada para resolver um determinado problema acarreta na criação de outro

Entretanto, em contrapartida à essa otimização, o mecanismo de replicação produz um aumento considerável no número de transmissões, consumindo rapidamente recursos de rede importantes como capacidade de armazenamento (*buffers* são completamente preenchidos por réplicas de mensagens) e comunicação (canal de comunicação torna-se congestionado devido ao grande número de transmissões) dos nós. Neste contexto, a replicação de mensagens permite que a taxa de entrega e atraso médio sejam otimizados apenas durante um período de tempo inicial, ou seja, até que os recursos de rede citados sejam consumidos.

3.2.3.4 Gerenciamento de Buffer

O gerenciamento de *buffer* é um requisito importante que, por muitas vezes, não é abordado pelas metodologias de encaminhamento de mensagens propostas pelos algoritmos de roteamento tolerantes a atrasos e desconexões. Entretanto, como as estratégias DTN baseiam-se no paradigma *store-carry-and-forward*, juntamente com mecanismos de replicação de mensagens, torna-se imprescindível definir uma metodologia de descarte que permite gerenciar, localmente, o recurso de armazenamento do nó.

3.3 Considerações Finais

As redes veiculares são fundamentais na transmissão, propagação e roteamento de dados indispensáveis para o futuro sucesso de arquiteturas computacionais inteligentes tais como: Sistema Inteligente de Transporte e Cidades Inteligentes (*Smart cities*). Entretanto, o encaminhamento das mensagens no ambiente veicular torna-se uma tarefa complexa devido à alta mobilidade dos veículos, ao curto intervalo de tempo de comunicação, as malhas viárias heterogêneas – por vezes cobertas por infraestruturas externas em outras não – e a rápida mudança da topologia de rede, que apresenta cenários de alta densidade veicular e cenários onde a quantidade de veículos é escassa. Essas características, por exemplo, não permitem que tecnologias conhecidas de comunicação, como os protocolos utilizados na infraestrutura da Internet, possam ser aplicadas nesse ambiente sem que ao menos adaptações sejam necessárias (ISENTO et al., 2013).

Sendo assim, para que essas novas arquiteturas inteligentes possam alcançar seus objetivos, fornecendo serviços inovadores (de segurança, informação e entretenimento) a motoristas, passageiros e pedestres, novas tecnologias de transmissão e roteamento de dados são necessárias. Levando em conta esses desafios, um grande número de estratégias

de roteamento têm sido propostas com intuito de garantir que mensagens, encaminhadas através de veículos intermediários, possam ser roteadas e entregues aos seus destinos. Trabalhos de revisão da literatura, como proposto por (LIU et al., 2016), mostram que, apesar da diversidade de metodologias utilizadas pelos autores (baseadas na topologia da rede, sensível ao tráfego, baseada em *cluster*), com exceção de alguns algoritmos tradicionais baseados na topologia da rede, as estratégias de roteamento baseadas na posição dos veículos alcançam melhores resultados.

Todavia, as estratégias baseadas na posição presumem que a informação sobre a localização dos veículos está acessível (a todo momento e a qualquer nó da rede) sempre que necessária. Essa assunção está atrelada à existência de um serviço global de localização que pode ser acessado via comunicação com infraestruturas externas (V2I), tais como unidades laterais, semáforos inteligentes e tecnologias LTE. Neste contexto, questões técnicas, geográficas e financeiras impossibilitam que tais infraestruturas estejam disponíveis ao longo de toda a malha viária, tornando complexo o processo de aquisição da localização dos veículos, requisito indispensável para que os modelos de roteamento baseados em posição possam operar adequadamente (XIA; YEO, 2014). Portanto, novos trabalhos de pesquisas, voltados à concepção de modelos de previsão capazes de estimar a localização dos veículos são fundamentais para que as estratégias de roteamento possam operar nos mais variados cenários do ambiente veicular. O estudo sobre os modelos de mobilidade dos nós torna-se imprescindível para que os algoritmos de previsão sobre a localização apresentem resultados satisfatórios, por esse motivo uma análise mais detalhada sobre tais modelos é apresentada no capítulo 4.

4 Modelos de Mobilidade

Este capítulo destina-se a apresentar os principais modelos de mobilidade utilizados na literatura e que compõem cenários de simulação criados para avaliar o comportamento dos protocolos de roteamento propostos para o ambiente das Redes Tolerantes a Atraso e Desconexões. Considerando que os modelos de mobilidade possuem significativo impacto sobre os resultados das simulações, torna-se necessário um estudo mais detalhado sobre estes no intuito de analisar e identificar corretamente quais modelos são mais apropriados para serem utilizados durante o processo de simulação e validação do protocolo de roteamento proposto nesta tese de doutorado.

4.1 Considerações Iniciais

Em redes sem fio, a comunicação pode ser baseada em uma infraestrutura no modo ad-hoc, onde os dispositivos móveis são conectados diretamente uns aos outros, sendo responsáveis pelos seus roteamentos (redes móveis ad-hoc). Quando redes sem fio são investigadas e simulações são efetuadas, faz-se necessário considerar o movimento dos nós que a compõem dentro do ambiente de simulação proposto. Existem muitos exemplos comuns de cenários que envolvem o movimento contínuo dos nós:

- Na construção e configuração de uma infraestrutura de rede local muitos pontos de acesso WLAN são instalados. Dentro dessa estrutura os usuários estão se movendo e efetuando *roaming* entre os diferentes pontos de acesso sem perder sua conectividade.
- Usuários de posse de telefones celular estão caminhando em uma cidade. Enquanto movem-se, o telefone celular muda de estações das quais está conectado. É possível, para o usuário, continuar uma chamada sem que haja interrupção da mesma.
- Carros (dirigindo pelas ruas) usam comunicação “carro-a-carro” para transmitir informações a respeito de possíveis congestionamentos ou acidentes. Para tal, uma

rede ad-hoc móvel é configurada entre os carros que estão próximos uns dos outros. Tais redes são denominadas redes veiculares.

- Em uma situação de emergência (ex. terremotos e incêndios) a brigada de incêndio (bombeiros), o serviço de socorro (ambulância) e a polícia estão interligados a uma rede móvel ad-hoc para trocar informações e definir adequadamente os procedimentos a serem adotados.

Em cada um dos cenários (e em muitos outros) a mobilidade dos nós da rede possui um papel importante quando uma conexão está sendo estabelecida. Protocolos (roteamento ou algoritmos de entrega) precisam ser otimizados de acordo com a mobilidade dos nós. Atualmente, os resultados das simulações de rede que incluem nós móveis podem variar significativamente quando seus padrões de mobilidade são modificados (Seção 4.4).

Frequentemente, é difícil reunir dados reais de movimento (também conhecidos como rotas - Seção 4.2) de um número suficiente de nós para simulações. Para superar este problema, modelos de movimento sintéticos têm sido desenvolvidos, gerando dados simplificados de movimentos virtuais para um determinado número de nós. Existem muitos modelos de mobilidade com diferentes propriedades. A seção 4.2 tem por objetivo abordar e categorizar os principais modelos de mobilidade.

4.2 Categorização dos Modelos de Mobilidade

Esta seção descreve as diferentes categorias de modelos de mobilidade sintéticos. Existe uma vasta quantidade de modelos e cenários disponíveis, a categorização presente nesta seção não é completa, há outras categorias de modelos de mobilidade as quais não são discutidas nesta seção. Além de que, as categorias não são independentes umas das outras. Um modelo simples de mobilidade deve estar presente em muitas das categorias apresentadas. Em contrapartida, a categorização apresentada possibilita obter uma visão geral sobre os modelos de mobilidade existentes, evidenciando a diversidade dos modelos e cenários de simulação disponíveis.

4.2.1 Rotas e Modelos de Mobilidade Sintéticos

Rotas são mobilidades padrões vinculadas a situações da vida real. Tuduce (TUDUCE; GROSS, 2005) dá um exemplo para os registros de rotas, e seu estudo ele monitora 350 pontos de acesso WLAN espalhados por mais de 32 edifícios ao longo de três meses. Os

pontos de acesso foram configurados para executar em modo infraestrutura e os endereços de MAC de suas interfaces de rede foram utilizados como identificadores dos usuários. Os pontos de acesso foram verificados a cada minuto para obter informação sobre a associação de usuários. Deste modo, foi colhida a localização dos usuários na WLAN (considerando que os usuários estavam online) e implicitamente também estimados os movimentos deles. Em outro exemplo, Tang (TANG; BAKER, 2000) traçou (rastreou) a mobilidade de 74 usuários dentro da rede de um campus universitário durante 12 semanas. Adicionalmente, operadoras de redes de celular móveis forneceram rotas interessantes dos usuários que estavam utilizando celulares.

Modelos de movimento sintéticos, foco principal neste capítulo, não são diretamente baseados nos "registros de usuários" relativos aos seus comportamentos de movimento. Em vez disso, padrões de mobilidade são gerados por algoritmos que especificam comportamentos virtuais dos usuários e a predição de seus movimentos. Estes movimentos virtuais são usualmente adaptados para uma área de simulação com um tamanho limitado. Por um lado, modelos de mobilidade sintéticos podem ser inspirados por rotas, na tentativa de modelar o comportamento dos usuários em uma situação real. Por outro lado, as rotas podem ser usadas para verificar os modelos de mobilidade sintéticos por comparação.

4.2.2 Modelos de Mobilidade Individuais e de Grupo

Modelos de mobilidade podem ser caracterizados pelo número de nós que são descritos por um simples modelo de mobilidade.

Modelos de mobilidade individuais consideram o movimento de um nó de forma individual, ou seja, o movimento de um ser humano ou de um animal. Ainda que haja muitos nós, eles são tipicamente considerados independentes uns dos outros e seus movimentos são previstos de forma independente. São exemplos de modelos de mobilidade individuais: o Modelo *Random Walk*, o Modelo *Random Waypoint*, o Modelo *Random Direction*, o Modelo Gauss-Markov, e o Modelo Manhattan, como pode ser visto na seção 4.2.3.

Modelos de Mobilidade de Grupo, em contraste, consideram um conjunto de nós individuais como um grupo, que se move como um todo. O movimento dos nós está relacionado um com os outros. Usualmente, há um líder do grupo ou um ponto móvel de orientação. Os nós do grupo reúnem-se em torno deste ponto de orientação e seguem seus movimentos com alguns desvios especificados. O modelo de grupo costuma ser mais

realistas que os modelos de mobilidade individuais. Na realidade, o movimento de seres humanos não é usualmente independente uns dos outros. Pessoas que estão caminhando em grupos normalmente possuem direções similares (indo para um shopping). Animais estão frequentemente movendo-se em manadas ou em enxames. Tem-se como exemplos de modelos de mobilidade de grupos: o Modelo Perseguição (*Pursue Model*), o Modelo Coluna (*Column Model*), o Modelo Comunidade Nômade (*Nomadic Community Model*), e o Modelo Ponto de Referência do Grupo (*Reference Point Group Model*) (BAI; HELM, 2004), como pode ser visto na seção 4.2.3.

4.2.3 Modelos de Mobilidade Humano, Animal e Veicular

Outra categorização de modelos de mobilidade é baseada na natureza do nó que causa o movimento. O critério desta categorização não está na quantidade de nós, mas no comportamento dos mesmos.

Modelos de mobilidade humanos descrevem os movimentos de seres humanos em determinados cenários. Como exemplo destes cenários temos pedestres no interior das cidades, ou ainda, funcionários durante o trabalho em grandes obras ou construções. Como exemplo de modelos de mobilidade humano temos o Modelo Random Walk e o Modelo Random Waypoint. Modelos de mobilidade animal são analogamente baseados no movimento de animais, com manadas ou enxames. Como exemplos de modelos de mobilidade animal temos o Modelo Random Walk, o Modelo Pursue (Perseguição), e o Modelo Nomadic Community (Comunidade Nômade).

Modelos de mobilidade veicular são previsões para os movimentos veiculares, como carros e tanques. Frequentemente a mobilidade veicular está restrita a ruas e regras de tráfego, os quais impõem restrições particulares para seus padrões de movimento. Exemplos de modelos de mobilidade veicular são o Modelo Freeway (auto-estrada) (BAI; HELM, 2004), e o Modelo Manhattan.

4.2.4 Modelos de Mobilidade para Situação Normal e Situação Especial

Modelos de mobilidade podem também ser categorizados pela procura do personagem da situação da qual ele está descrevendo.

Modelos de mobilidade de situação normal assumem cenários ordinários sem influências especiais. Pessoas estão caminhando numa área para pedestres, trabalhando em construções, ou dirigindo nas ruas, por exemplo. Exemplos de modelos de mobili-

dade humanos são o Modelo Random Walk, o Modelo Random Waypoint, ou o Modelo Manhattan.

Modelos de Mobilidade de situação especial modelam situações não usuais, das quais entidades apresentam comportamento de movimento especializado. Situações de emergência são exemplos de situações especiais, incêndio em uma construção ou um terremoto. Exemplos de Modelos de Mobilidade de Situação Especial são: o Modelo Perseguição (Pursue Model) e o Modelo Coluna (Column Model).

4.2.5 Outros Modelos de Mobilidade

Além da categorização dos modelos de mobilidade apresentados anteriormente, existem outros modelos de mobilidade que são especializados para certos cenários. Estes tipos de modelos de mobilidade podem ser encontrados com frequência em literaturas especiais, ou ainda, podem ser derivados de modelos de mobilidade já disponíveis, se necessário.

Um exemplo de modelo de mobilidade especial é o problema dos trilhos, onde os trens se movimentam e não pode haver colisões. Ou ainda, se um usuário de telefone celular perder contato com a estação base, por exemplo, ele pode optar por mudar seu movimento atual no intuito de obter uma qualidade de serviço melhor. Em alguns casos as colisões entre usuários influenciam em seus movimentos, como, por exemplo, os personagens de jogos de computadores. Os modelos de mobilidade social (HERRMANN, 2003) consideram, por exemplo, as interações e relacionamentos entre usuários móveis para definir seus movimentos. Modelos de mobilidade podem também ser derivados de fenômenos naturais ou físicos, por exemplo, os movimentos de moléculas ou fluídos.

Algumas áreas de simulações especializadas são necessárias em modelos de mobilidade. Ao longo do tempo algumas questões têm sido respondidas, como: o que acontece com a mobilidade de um nó, quando este atinge o limite da área simulada? Possíveis soluções são: diminuir a velocidade de deslocamento, mudar a direção, ou ainda, recuar. Um exemplo para um área de simulação especial é a Área de Simulação Ilimitada (CAMP; BOLENG; DAVIES, 2002). Se um nó em movimento alcança a borda da área de simulação, ela reaparece no lado oposto da borda alcançada. Entretanto, nós podem nunca alcançar o limite da área de simulação. Pela aplicação do algoritmo da Área de Simulação Ilimitada, a área de simulação é mapeada para um todo. Este mapeamento é ilustrado na Figura 8.

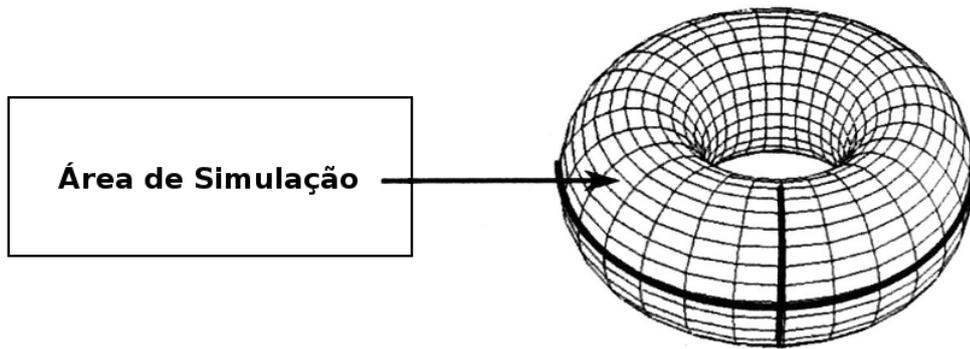


Figura 8: Área de Simulação Ilimitada.

Outro problema relatado para área de simulação é a ocorrência de obstáculos dentro da mesma. O Modelo de Mobilidade Obstáculo (BAI; HELM, 2004) fornece um exemplo de área de simulação especializada. Ele permite definir obstáculos que diretamente influenciam o movimento das entidades. A seção 4.3 apresenta as várias abordagens de modelos de mobilidade em detalhes.

4.3 Modelos de Mobilidade

Esta seção discute, em detalhes, vários exemplos de modelos de mobilidade que são constantemente utilizados na literatura. Uma descrição mais detalhada dos modelos de mobilidade apresentados pode ser encontrado em (CAMP; BOLENG; DAVIES, 2002), (BAI; HELM, 2004), e (SÁNCHEZ; MANZONI, 2001). As propriedades mais importantes dos modelos apresentados são descritas e ilustradas no intuito de mostrar os possíveis padrões de movimento desses modelos.

4.3.1 Modelo *Random Walk*

O Modelo de Mobilidade *Random Walk* é um modelo largamente utilizado na literatura, ele é baseado na ideia de que os nós movimentam-se de forma natural e imprevisível. Neste modelo de mobilidade um nó move-se de sua localização atual para outra localização escolhendo de forma aleatória uma nova direção e velocidade. A direção e a velocidade são limitadas para uma faixa de valores pré-definidos, por exemplo, eles são escolhidos a partir: [velocidade mínima; velocidade máxima] e $[0; 2\pi]$. Cada movimento é limitado para um intervalo de tempo constante. Após um movimento acabar, a direção e a velocidade para o próximo movimento são calculadas. Quando o nó atinge o limite

da área de simulação, ele retorna deste limite com um ângulo que depende da direção de entrada, e então continua seu caminho. Algumas vezes o movimento não é limitado a um intervalo de tempo constante, mas a uma distância constante. Na Figura 9 o Modelo *Random Walk* é ilustrado. O quadrado representa a área de simulação, com a coordenada $(0, 0)$ como origem e a relativa distância dos eixos X e Y para ela.

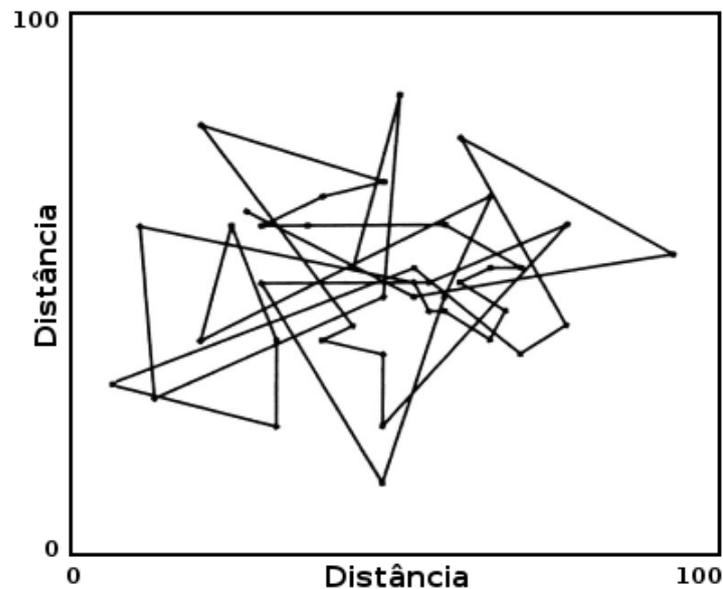


Figura 9: Modelo de Mobilidade *Random Walk* com intervalo de tempo constante.

A caminhada começa no centro de uma área de simulação. É possível verificar que neste modelo utiliza-se especialmente a área em torno do ponto de partida. Pode ser verificado também que o algoritmo gera movimentos com curvas fechadas e paradas, as quais podem não ser muito realistas para determinados cenários. Isto é causado pelo fato de que o Modelo de Mobilidade *Random Walk* é um padrão de mobilidade sem memória. No cálculo do próximo movimento, não há conhecimento sobre os movimentos anteriores que foram utilizados. A velocidade e direção atual de um movimento é completamente independente das suas velocidades e direções anteriores.

4.3.2 Modelo *Random Waypoint*

O Modelo de Mobilidade *Random Waypoint* é também um modelo largamente utilizado na literatura, sendo muito similar ao Modelo de Mobilidade *Random Walk*. Neste modelo de mobilidade um nó escolhe uma coordenada de destino aleatória (dentro da área de simulação) e uma velocidade aleatória (entre [velocidade mínima; velocidade máxima]). Então ele se move de sua localização atual para a localização destino escolhida.

Adicionalmente, o Modelo de Mobilidade *Random Waypoint* define um tempo de pausa entre dois movimentos. Após uma pausa, um novo movimento é calculado. Se o tempo de pausa for configurado com zero e a faixa de velocidade escolhida for similar, o Modelos de Mobilidade *Random Waypoint* é idêntico ao Modelo de Mobilidade *Random Walk*.

A Figura 10 ilustra o padrão de movimento de um nó que usa o Modelo de Movimento *Random Waypoint*. Ele inicia no centro da área de simulação. Mais uma vez, o algoritmo gera movimentos com curvas fechadas e paradas.

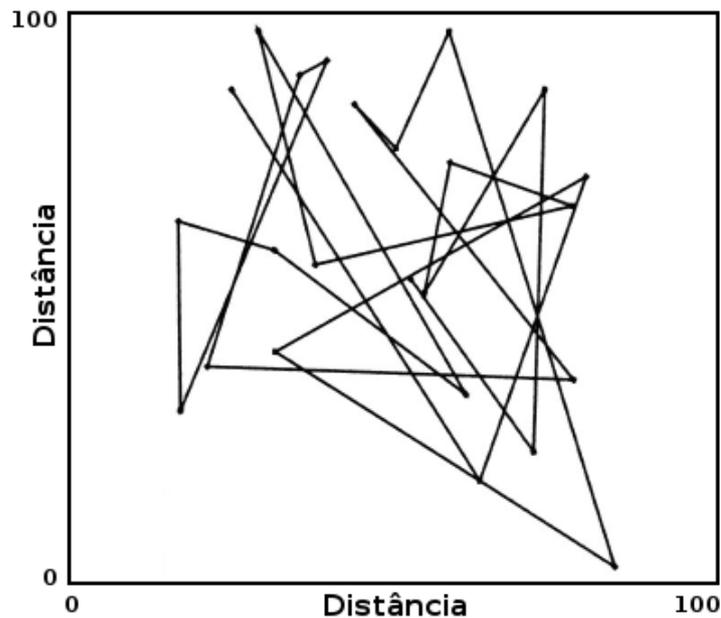


Figura 10: Modelo de Mobilidade *Random Waypoint*.

4.3.3 Modelo *Random Direction*

No Modelo de Mobilidade *Random Direction*, um nó escolhe uma direção aleatória (na faixa $[0; \pi]$) e uma velocidade aleatória (na faixa [velocidade mínima; velocidade máxima]), similar ao Modelo de Mobilidade *Random Walk*. O nó move-se, na direção e velocidade escolhida, até alcançar o limite da área de simulação. Alcançando o limite ele para por um tempo pré-definido, antes de escolher a próxima direção e velocidade para então mover-se novamente.

Na variação deste modelo o nó não se move até o limite da área de simulação, mas sim para em algum momento do seu trajeto. Este comportamento pode ser também simulado usando o Modelo de Mobilidade *Random Waypoint*.

Uma amostra para o padrão de movimento do Modelo de Mobilidade *Random*

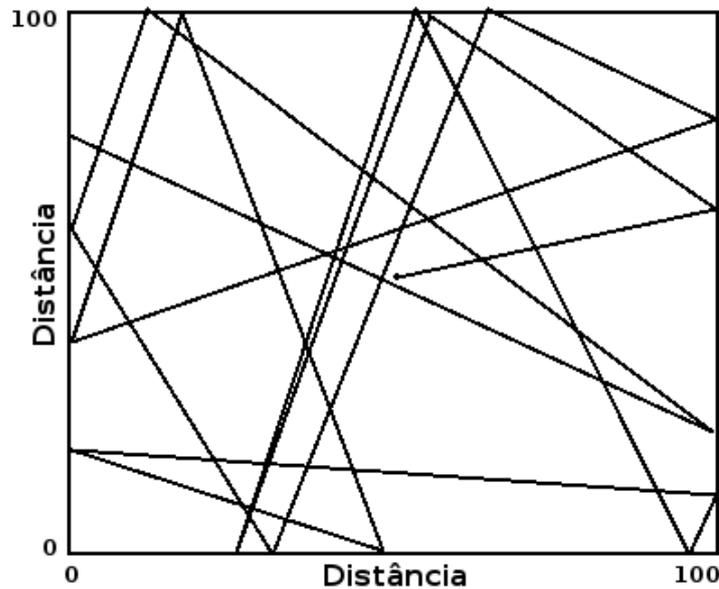


Figura 11: Modelo de Mobilidade *Random Direction*.

Direction é ilustrado na Figura 11. Nela pode ser visto que em comparação com os modelos *Random Walk* e *Random Waypoint*, o Modelo de Mobilidade *Random Direction* utiliza toda a área de simulação, não estando focado apenas no centro dela.

4.3.4 Modelo Gauss-Markov

No Modelo de Mobilidade Gauss-Markov é atribuído inicialmente ao movimento uma velocidade e um sentido. Em intervalos de tempo fixados, uma atualização da direção e velocidade é aplicada para a entidade. Ao contrário dos modelos descritos anteriormente, o Modelo de Mobilidade Gauss-Markov possibilita que os novos movimentos calculados sejam dependentes dos movimentos anteriormente efetuados. O grau de dependência dos novos movimentos com relação aos anteriores é adaptado por um parâmetro ($\alpha = [0, 1]$).

- $\alpha = 0$: O novo movimento não depende de movimentos anteriores e resultados similares ao random walk são obtidos;
- $0 < \alpha < 1$: níveis intermediários de aleatoriedade são obtidos;
- $\alpha = 1$: O nó se move de forma linear;

Adicionalmente, uma velocidade média pode ser especificada para um nó. Para evitar colisões com o limite da área de simulação, a direção do nó é adaptada quando ele

se aproxima do limite. Quando o nó encontra-se a uma certa distância do limite da área, este é forçado a se distanciar deste limite. A direção atual é adaptada para o nó mover-se para longe da borda como base para os cálculos da próxima etapa. Isto evita, que um nó permaneça próximo a um dos limites por um longo período de tempo.

Quando o intervalo de tempo pré-definido expira, uma nova direção e velocidade é calculada, baseada na localização, velocidade e direção atuais. Outras implementações deste modelo com diferentes propriedades também são encontradas em literaturas específicas.

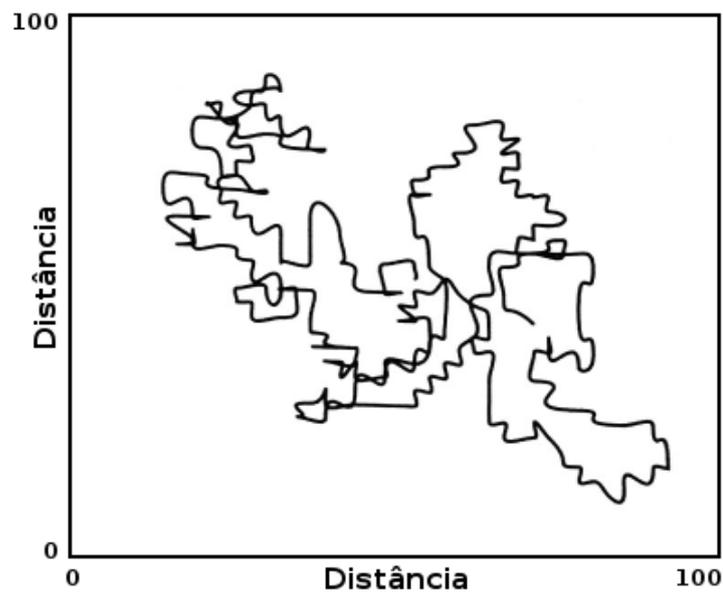


Figura 12: Modelo de Mobilidade Gauss-Markov.

A Figura ?? ilustra um exemplo de padrão de viagem de um nó usando o Modelo de Mobilidade Gauss-Markov, iniciando sua trajetória a partir do centro da área de simulação. Pela adaptação da direção e velocidade atualizadas com base na direção e velocidade atuais, o Modelo de Mobilidade Gauss-Markov não apresenta a mesma precisão dos modelos de mobilidade descritos anteriormente no que diz respeito a mudança da sua trajetória, ou seja, o intervalo de tempo em que nó interrompe seu movimento e posteriormente volta a se locomover.

4.3.5 Modelo Manhattan

O Modelo de Mobilidade Manhattan é um modelo amplamente utilizado, ele é baseado na ideia de que o movimento dos nós está frequentemente ligado a ruas ou avenidas.

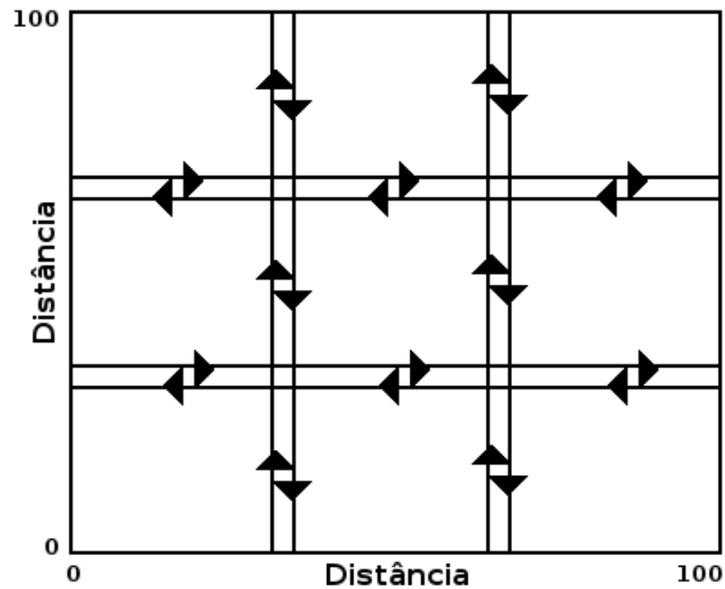


Figura 13: Modelo de Mobilidade Manhattan.

Um mapa é especificado com ruas (ambas as direções) e cruzamentos onde os nós movimentam-se. Uma aceleração realística pode ser definida (por exemplo, para carros), assim como uma velocidade média. Adicionalmente uma distância segura entre dois nós é configurada.

Os nós movem-se em ruas pré-definidas, as trocas das ruas por onde estão se movimentando acontecem em um cruzamento de acordo com uma determinada probabilidade. Um exemplo de configuração é:

- $P(\text{em frente}) = 0.5$;
- $P(\text{virar à esquerda}) = 0.25$;
- $P(\text{virar à direita}) = 0.25$;

A Figura 13 ilustra um exemplo de mapa com ruas para o Modelo de Mobilidade Manhattan. O nó se movimentará por uma rua pré-definida, mudando para outra rua ao passar por um cruzamento a partir de uma determinada probabilidade.

4.3.6 Modelo *Column*

O Modelo de Mobilidade *Column* é um modelo de mobilidade de grupo onde cada nó móvel segue um ponto de referência. Pontos de referência são arranjados em uma

linha. A linha também encontra-se em movimento, seguindo um modelo de mobilidade utilizado pelo nó. O ângulo da linha pode ser fixado ou a linha pode ser rotativa. Os nós móveis não são diretamente aproximados dos pontos de referência. Em vez disso eles estão movimentando-se em direção a uma coordenada próxima do seu ponto de referência, que é escolhida de forma aleatória. Exemplos para modelo de mobilidade de grupo são:

- um comboio de caminhões que dirigem-se um após o outro numa fila;
- tanques de guerra posicionados lado a lado e aproximando-se de um inimigo;

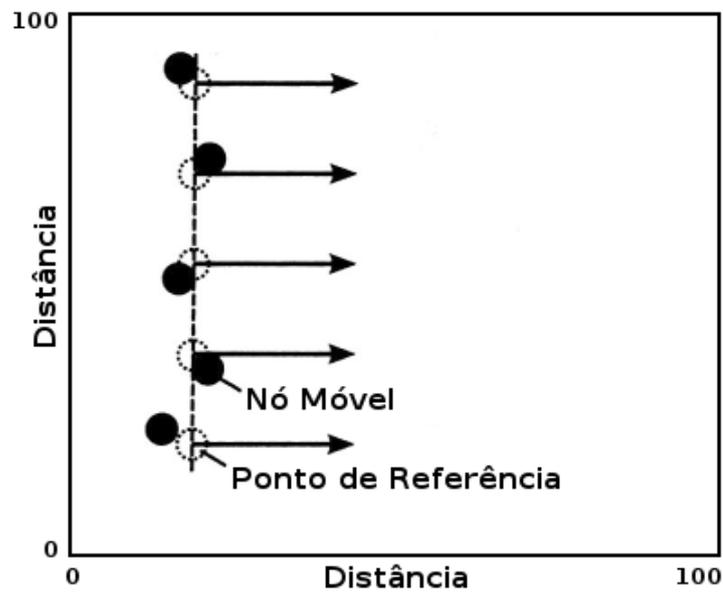


Figura 14: Modelo de Mobilidade *Column*.

A Figura 14 ilustra o movimento de grupo do Modelo de Mobilidade *Column*. Nela é mostrado que um grupo de nós móveis está seguindo pontos de referência numa linha vertical. Cada nó móvel está se aproximando do seu próprio ponto de referência, tendo pequenos desvios na sua direção. A linha está se movendo como um todo, como mostrado pelos vetores de direção.

4.3.7 Modelo *Pursue*

O Modelo de Mobilidade *Pursue* (Perseguição) é um modelo de mobilidade de grupo onde um grupo de nós móveis está perseguindo uma única referência. O nó de referência está usando um modelo de mobilidade individual, como por exemplo, o Modelo

de Mobilidade Random Walk. Os outros nós estão perseguindo o nó de referência, entretanto, pequenos desvios são agregados as suas direções. Adicionalmente, uma aceleração é simulada neste modelo. Um exemplo deste cenário é um grupo de turistas que estão seguindo um guia em um museu.

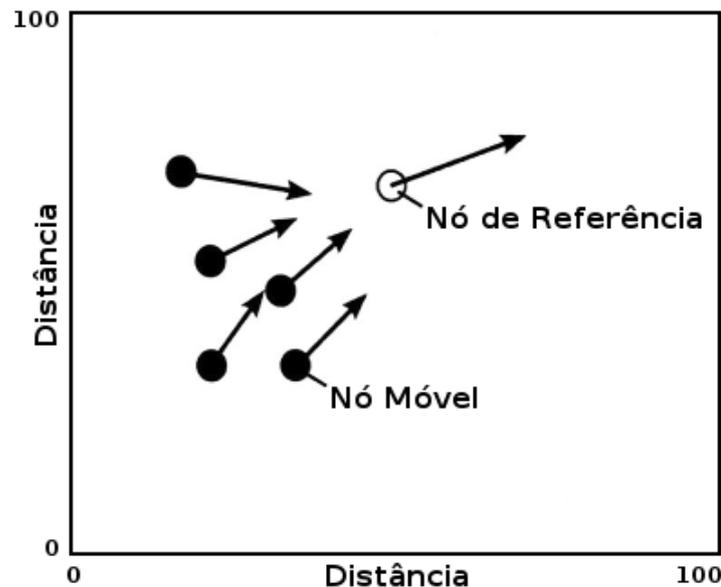


Figura 15: Modelo de Mobilidade *Pursue*.

A Figura 15 ilustra o movimento de um grupo para o Modelo de Mobilidade *Pursue*. O nó de referência é ilustrado se movendo em uma determinada direção (retratado por um vetor). Os outros nós estão se aproximando do nó de referência com variações leves em suas direções (também retratadas por vetores).

4.3.8 Modelo *Nomadic Community*

No Modelo de Mobilidade *Nomadic Community* os nós móveis estão seguindo um único ponto de referência. Todos os nós estão compartilhando o mesmo ponto de referência e estão movendo-se aleatoriamente em torno dele. O ponto de referência segue um modelo de mobilidade individual, como por exemplo, o Modelo de Mobilidade *Random Walk*. Quando o ponto de referência para de se mover, os nós móveis continuam a se mover em torno dele. Como exemplo para este modelo de movimento de grupo temos nômades que se movem de um local para outro.

A Figura 16 ilustra o movimento de grupo para o Modelo de Mobilidade *Nomadic Community*. O nó de referência é ilustrado se movimentando em uma determinada direção

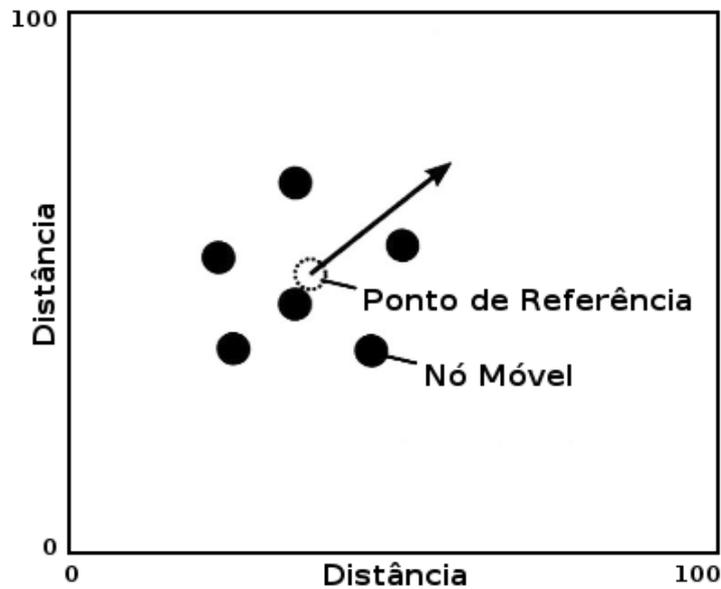


Figura 16: Modelo de Mobilidade *Nomadic Community*.

(retratado pelo vetor). Os outros nós estão se movendo aleatoriamente em torno do nó de referência.

A seção 4.4 analisa abordagens de seleção de modelos de mobilidade para determinados cenários de simulação, propondo critérios simples de seleção.

4.4 Seleção de Modelos de Mobilidade Adequados

Assim como em outros modelos de simulação, uma avaliação sobre o custo-benefício precisa ser considerado no que diz respeito à precisão de um modelo de mobilidade e o seu custo computacional. Quanto mais preciso um modelo de mobilidade é e quanto mais ele se aproxima de um cenário da vida real para o qual é modelado, mais realistas serão os resultados produzidos. Contudo tais modelos de mobilidade realistas usualmente apresentam alta complexidade. Esse aumento de custos em termos de esforços para implementação e também em termos de baixos desempenhos (lentidão) nas simulações podem se tornar um sério problema. Se o modelo de mobilidade, por outro lado, é simplificado, sendo sua implementação fácil, tal característica permitirá obter um bom desempenho durante a simulação. Entretanto, os resultados do modelo também serão simplificados.

Embora os modelos simples sejam frequentemente usados nas simulações (por exemplo nas pesquisas sobre redes ad-hoc), ele é razoável para adaptar o modelo de

mobilidade para o espaço problema atual. Em (CAMP; BOLENG; DAVIES, 2002) é ilustrado que os modelos de mobilidade influenciam significativamente os resultados das simulações. O trabalho conclui, que o desempenho dos protocolos de redes ad-hoc variam significativamente sob a influência de diferentes modelos de mobilidade. Isto implica na importância de se escolher um modelo de mobilidade que realmente se encaixe no problema descrito. Também em (GÜNES; WENIG, 2009) a seleção apropriada de modelos de mobilidade bem conhecidos e propagação de rádio é discutida com respeito à simulação em redes ad-hoc móveis.

Usualmente não é uma boa ideia apenas utilizar um simples modelo como o Random Walk sem verificar se ele encaixa-se no problema que está sendo estudado. Contudo os modelos simples podem fornecer um bom ponto de início para as simulações. Eles podem também ser usados como uma alternativa para modelos mais complexos. Resultados obtidos com modelos complexos podem ser comparados aos resultados obtidos com modelos simplificados para validar que o comportamento dos nós móveis atuais tem impacto nos resultados. Entretanto, mesmo o uso de modelo simples (como descrito na seção 4.3), necessita de algumas avaliações. Cada um dos modelos simples mostram diferentes padrões especiais de movimento que podem ser mais realistas para cenários especiais, que outros. O Modelo Random Direction, por exemplo, utiliza toda a área de simulação e não está focado no centro da área como o Modelo Random Walk e o Modelo Random Waypoint.

Para encontrar um modelo de mobilidade para um certo cenário, torna-se uma boa ideia efetuar uma revisão sobre os modelos de mobilidade que resolvem o mesmo problema em outros cenários semelhantes. E mais, os modelos podem ser usados diretamente como são, ou eles podem ser adaptados para um novo espaço problema. Outra abordagem é o simples uso do mesmo modelo de mobilidade que outros pesquisadores usaram dentro do mesmo campo de pesquisa (por exemplo, investigar protocolos para redes ad-hoc móveis), se possível. Esta abordagem fornece uma metodologia de comparação mínima entre diferentes soluções para um mesmo problema.

4.5 Considerações Finais

Existe um grande número de modelos de mobilidade que são utilizados para simulações em redes sem fio. O capítulo em questão apresentou várias categorias de modelos de mobilidade e descreveu o funcionamento de cada um deles em detalhes. Através dessa

abordagem foi possível compreender a importância em definir o modelo de mobilidade apropriado para um determinado cenário de pesquisa, visto que esses modelos têm impacto significativo sobre os resultados das simulações. Eles precisam ser complexos o bastante para fornecerem resultados representativos, ao mesmo tempo em que necessitam ser simples o bastante (fácil implementação) para fornecerem bom desempenho (rápido) durante as simulações.

A maior precisão dos padrões de mobilidade dos nós são, evidentemente, conseguidas através do recolhimento informações (rotas) sobre o movimento de entidades reais. Se disponível, essas rotas podem também ser usadas para verificar a aproximação da mobilidade dos modelos de mobilidade sintéticos com o comportamento do usuário real. Sendo assim, quanto mais realista forem os dados utilizados pelos modelos de mobilidade mais próximas do ambiente real serão as simulações produzidas. Essa dinâmica permite avaliar adequadamente o desempenho das estratégias de roteamento propostas para as redes sem fio, como é o caso do ambiente veicular. No capítulo 5 são apresentadas as principais estratégias de roteamento DTN, VANET e VDTN alinhadas com esta tese de doutorado.

5 Estratégias de Roteamento

5.1 Roteamento em Redes Tolerantes a Atrasos e Desconexões

As Redes Tolerantes a Atrasos e Desconexões podem ser caracterizadas como redes sem fio que apresentam conexões ocasionais devido aos constantes particionamentos, sendo necessária, na maioria dos casos, a utilização de um conjunto de protocolos (CERF et al., 2007). As DTNs são compostas por diversos conjuntos de nós, assim como ocorre nas redes *ad hoc*, que comunicam-se sem a existência de uma infraestrutura fixa. Os contatos ocorrem devido à alta mobilidade do nós, que além de permitir que as mensagens trafeguem até seu destino, também promove frequentes perdas de conexões. Na literatura, a mobilidade é vista como principal fator para as constantes desconexões (ZHANG, 2006).

As redes *ad hoc*, assim como as DTNs, também apresentam frequentes desconexões. Contudo, nesse tipo de rede as estratégias de roteamento utilizam-se da suposição sobre a existência de um caminho válido que liga um nó de origem a um nó de destino. Dentro desse contexto, estratégias de roteamento baseadas em variações de algoritmos projetados para redes tradicionais, tais como AODV (*Ad hoc On-demand Distance Vector*), DSR (*Dynamic Source Routing Protocol*) e DSDV (*Destination-Sequenced Distance Vector*) (QIN; KUNZ, 2004) foram propostas, utilizando a técnica de *store-and-forward* como modelo de encaminhamento. Entretanto, o modelo *store-and-forward* mostra-se inadequado para o ambiente DTN, já que a suposição sobre a existência de um caminho fim a fim não é cabível.

Com intuito de superar a inexistência de caminho válido entre dois nós, um novo modelo de encaminhamento de mensagens (*store-carry-and-forward*), extensão do modelo *store-and-forward*, foi criado (ZHANG, 2006). Nesta nova abordagem um nó retém (armazena) uma mensagem até que um contato com outro nó, considerado propício para o encaminhamento da mensagem, aconteça. Quando ele ocorre a mensagem é repassada ao nó contactado.

As DTNs também podem ser caracterizadas de acordo com a forma como a topologia da rede se altera, ou seja, quando as mudanças ocorridas são conhecidas, podem ser determinadas ou ainda previstas, tem-se uma rede determinística. Nesse tipo de rede o encaminhamento de mensagens pode ser escalonado. Todavia, quando as alterações sobre a topologia são imprevisíveis, tem-se uma rede estocástica, onde as estratégias utilizam-se de um encaminhamento aleatório. Além disso, são utilizadas, ainda, técnicas baseadas em dados históricos sobre o comportamento da rede, que visam dar suporte ao modelo de encaminhamento dos algoritmos e têm por objetivo aumentar sua eficiência de roteamento.

As redes estocásticas são mais comumente aceitas, sendo consideradas e utilizadas na maioria das aplicações. Por isso, são propostos como trabalhos de pesquisa diversos modelos de roteamento para esse tipo de rede, sendo o mais elementar baseado em *flooding*. Nos modelos baseados em *flooding* várias cópias das mensagens são duplicadas para todos os nós da rede, vide (VAHDAT; BECKER, 2000). Em contrapartida, muitas estratégias de roteamento possuem funcionamento baseado em dados históricos relacionados ao comportamento dos nós. Uma técnica conhecida dessa abordagem é a utilização de modelos matemáticos que estimam a probabilidade de entrega das mensagens para cada nó da rede como, por exemplo, o *PRoPHET* (LINDGREN; DORIA; SCHELÉN, 2003).

Existem ainda, outros dados que podem ser utilizados pelas estratégias de roteamento com intuito de otimizar seu desempenho, dentre os quais destacam-se: a frequência com que dois nós se encontram; a frequência com que os nós trafegam por determinadas regiões (sub-redes) (BURNS; BROCK; LEVINE, 2005) e o tempo de duração dos contatos entre os nós (JONES; LI; WARD, 2005). Importante destacar que a mobilidade dos nós é causa fundamental para que todos esses dados sejam criados e uma análise deste contexto possa ser efetuada, utilizando informações como posição, velocidade e trajetória.

As seções 5.1.1 e 5.1.2 apresentam as estratégias de roteamento tolerantes a atrasos e desconexões alinhadas com a tese de doutorado.

5.1.1 Roteamento com Disseminação Epidêmica

O roteamento baseado em disseminação epidêmica adota uma metodologia de encaminhamento do tipo *flooding*. Em outras palavras, estratégias que fazem uso desse tipo de disseminação distribuem diversas cópias das mensagens ao longo dos contatos efetuados com os outros nós. Essa abordagem mostra-se muito eficiente em determinados cenários, visto que as cópias das mensagens são disseminadas rapidamente, aumentando a probabilidade de alcançarem seu destino. Por outro lado, o *overhead* gerado para largura de

banda, espaço em *buffer* e consumo de energia é frequentemente proibitivo para ambientes de rede que possuem poucos recursos de comunicação, bateria e armazenamento como, por exemplo, as redes de sensores (SPYROPOULOS; PSOUNIS; RAGHAVENDRA, 2008).

A seguir são apresentadas as principais estratégias de roteamento que fazem uso da disseminação epidêmica:

5.1.1.1 Epidemic Routing

No *Epidemic Routing* (VAHDAT; BECKER, 2000), ou simplesmente Epidêmico, todos os nós, ao receberem uma mensagem, repassam uma cópia da dela para todos os seus vizinhos. Essa dinâmica foi adotada com o objetivo de produzir um roteamento através da maximização da taxa de entrega, na qual minimiza-se a latência e consome-se rapidamente os recursos de rede disponíveis. Ele possui esse nome porque seu funcionamento pode ser comparado à maneira como uma epidemia se prolifera.

A técnica de *flooding* proposta pelo *Epidemic Routing* permite repassar o maior número de mensagens a maior quantidade de nós da rede, fazendo com que a probabilidade de entrega das mensagens aumente. Tanto as mensagens geradas pelos nós quanto as mensagens recebidas de outros nós são armazenadas em *buffer*. Em condições normais, esses *buffers* possuem uma capacidade de armazenamento limitada, entretanto a estratégia epidêmica pressupõe que essa capacidade é infinita, para que possa funcionar adequadamente e obter os resultados esperados.

No *Epidemic Routing* quando dois nós estão em contato eles trocam seus *summary vectors*, vetores que contém os identificadores das mensagens armazenadas localmente. Essa técnica permite que os nós vizinhos tenham ciência das mensagens armazenadas remotamente (pelos outros nós) e evitem transmissões desnecessárias de mensagens. Apesar do *Epidemic* propor a maximização da taxa de entrega através da utilização da técnica de *flooding*, trabalhos posteriores (SPYROPOULOS; PSOUNIS; RAGHAVENDRA, 2008) mostraram que a utilização de muitas cópias em paralelo pode produzir péssimos resultados no que diz respeito ao desempenho da rede.

A utilização de uma grande quantidade de transmissões pelos métodos baseados em *flooding* promove contenções conforme o tráfego aumenta, e um rápido aumento no tempo de atraso de entrega das mensagens. Ainda que o *Epidemic* proponha a obtenção de uma alta taxa de entrega e um baixo tempo de atraso, ele pressupõe (necessita) que os nós possuam uma capacidade de armazenamento infinita, gerando também um *overhead*

muito alto de mensagens transmitidas.

Uma Versão modificada do protocolo *Epidemic*, o *Epidemic Oracle*, costuma estar disponível em simuladores para redes oportunistas ((KERÄNEN; OTT; KÄRKKÄINEN, 2009)). Ela é utilizada durante os experimentos, em comparação com outras estratégias, porque produz resultados de entrega e latência ideais. O *Epidemic Oracle* considera que todos os nós são capazes de identificar o momento em que as mensagens são entregues, e assim podem eliminar as cópias que possuem. Essa suposição permite gerenciar adequadamente o buffer de armazenamento, diminuir consideravelmente o número de transmissões, descongestionar o canal de comunicação, e assim obter taxas de entrega e latência ideais.

5.1.1.2 Spray And Wait

A estratégia *Spray and Wait* (SPYROPOULOS; PSOUNIS; RAGHAVENDRA, 2005), em contrapartida ao Epidêmico, transmite apenas um determinado número de cópias para cada mensagem gerada. Seu algoritmo busca limitar o número de cópias de mensagens e transmissões, no intuito de não comprometer seu desempenho. O *Spray and Wait* possui duas fases bem definidas: (1) *fase spray* → para cada mensagem gerada num nó de origem, C cópias são repassadas para C *relays*¹ distintos; (2) *fase wait* caso o destino não seja encontrado durante a fase de *spray*, os C nós que carregam uma cópia da mensagem fazem uma entrega direta ao destino.

O objetivo da estratégia *Spray and Wait* é repassar um número controlado de cópias das mensagens para garantir que ao menos uma delas chegue até o destino. O esquema utilizado pelo *Spray and Wait* inicia seu funcionamento com um total de C cópias no momento em que uma mensagem é gerada. Quando um nó contendo $C > 1$ cópias de uma mensagem efetua um contato com outro nó (que não possui uma cópia desta mensagem) ele transmite $C/2$ das cópias que possui localmente e mantém consigo $C/2$. Esse procedimento ocorre até que o nó possua apenas uma única cópia e a partir desse momento o mecanismo de roteamento é alterado, utilizando-se da transmissão direta ao destino (SPYROPOULOS; PSOUNIS; RAGHAVENDRA, 2008).

A fase de *spray* possui algumas regras para que a transmissão de mensagens ocorra: (1) assim como o *Epidemic*, no momento que dois nós efetuam contato estes trocam seus *summary vectors*, vetores que contém os *IDs* das mensagens que carregam. Essa abordagem evita que transmissões desnecessárias ocorram; (2) um nó que possui $C > 1$ cópias de uma mensagem envia $C/2$ destas cópias para o outro nó encontrado; (3)

¹Nós escolhidos para receber e retransmitir mensagens durante o seu roteamento.

após as cópias terem sido repassadas e o nó estiver carregando apenas uma delas, ele a transmitirá, obrigatoriamente, utilizando o mecanismo de entrega direta.

A estratégia *Spray and Wait* obteve bons resultados quando comparada ao *Epidemic*. Ela apresentou baixo tráfego de mensagens, controlando sua transmissão de forma mais eficiente em contrapartida ao método utilizado pelo Epidêmico. Ela ainda foi capaz de aumentar a probabilidade de entrega e obter tempos de atraso próximos ao *Epidemic* com menos cópias de mensagens espalhadas pela rede. Entretanto, o *Spray and Wait* diminui seu desempenhos consideravelmente quando exposto a ambientes onde os nós possuem baixa mobilidade.

Outras versões do *Spray and Wait* também foram propostas e podem ser encontradas na literatura (TOURNOUX et al., 2009), porém seus resultados não possuem grande relevância para o desenvolvimento da proposta apresentada nesta tese de doutorado.

5.1.2 Roteamento com Disseminação Probabilística

As estratégias de roteamento baseadas em disseminação probabilística utilizam dados estatísticos provenientes dos diversos contatos que ocorrem entre os nós. Esses dados são utilizados como métrica para determinar como o encaminhamento das mensagens deve acontecer. Dentre os dados que normalmente são utilizados destacam-se: a frequência com que os nós se encontram e a frequência com que os nós passam por uma determinada região. Ao contrário dos modelos baseados em disseminação epidêmica, um nó executando uma estratégia probabilística não retransmite as mensagens recebidas a qualquer um dos nós encontrados. Ela utiliza cálculos matemáticos com objetivo de determinar a probabilidade que os nós possuem de entregar as mensagens aos seus destinos.

A abordagem probabilística possibilita, em contrapartida ao modelo epidêmico, que uso dos recurso de rede seja otimizado. As estratégias de roteamento, mais relevantes, baseadas em disseminação probabilística são apresentados a seguir.

5.1.2.1 Shortest Expected Path Routing

O *Shortest Expected Path Routing SEPR* (TAN; ZHANG; ZHU, 2003) faz uso de dados históricos para estimar a topologia da rede e computar a probabilidade de dois nós se encontrarem. Através dessa estimativa o *SEPR* é capaz de definir como o encaminhamento das mensagens deve acontecer. O cálculo da probabilidade baseia-se

no tempo em que dois nós permanecem conectados; para o *SEPR* todos os nós da rede possuem, localmente, uma tabela contendo as probabilidades que possuem de encontrar com outros nós.

No momento em que os contatos com outros nós acontecem suas tabelas são trocadas, e novos cálculos sobre as probabilidades são efetuados. Ao receber e atualizar sua tabela com novas probabilidades de contato o *SEPR* utiliza o algoritmo de *Dijkstra* para determinar a complexidade do caminho necessário para rotear as mensagens. Para cada mensagem gerada por um nó, assume-se que o tamanho do caminho efetivo (*EPL – Effective Path Length*) para entrega da mensagem é infinito, sendo alterado no momento em que a mensagem é encaminhada a outro nó da rede que possui um tamanho de caminho menor que o atual.

O *EPL* baseia-se nos dados históricos de entrega das mensagens, e é inversamente proporcional à probabilidade de entrega. Em resumo, quanto menor for o valor do *EPL*, maior será a probabilidade de entrega da mensagem ao seu destino, sendo seu valor utilizado para definir para quais nós a mensagem deve ser encaminhada. O *SEPR* trabalha com *buffers* de tamanho fixo, e caso ocorra um *overflow* são descartadas, em primeiro lugar, as mensagens que possuem menor valor de *EPL*.

O *Shortest Expected Path Routing* apresentou resultados satisfatórios para o número de mensagens espalhadas pela rede (diminuindo) e para taxas de entrega das mensagens (aumentando) quando comparado ao *Epidemic* (TAN; ZHANG; ZHU, 2003).

5.1.2.2 PRoPHET

O *Probabilistic Routing Protocol using History of Encounters and Transitivity* – PRoPHET (LINDGREN; DORIA; SCHELÉN, 2003) baseia-se no histórico de encontros e transitividade para computar a probabilidade que um nó possui em entregar uma determinada mensagem. Semelhante ao roteamento epidêmico, quando dois nós iniciam um contato eles trocam suas listas contendo informações sobre as mensagens armazenadas localmente. Contudo, diferentemente do *Epidemic*, o PRoPHET armazena uma informação extra para cada mensagem em sua lista. Essa informação corresponde à probabilidade que o nó a possui de entregar uma mensagem para um destino conhecido b , onde $P(a, b) \in \mathbb{R} \mid 0 \leq P(a, b) \leq 1$.

O valor de $P(a, b)$ aumenta sempre que a e b se encontram. Se a e b deixam de se encontrar frequentemente, $P(a, b)$ diminui à proporção que o tempo transcorre. Esse

tempo é controlado por uma constante k denominada constante de envelhecimento, que corresponde ao número de unidades de tempo transcorridas desde a última vez que a métrica foi atualizada. A probabilidade de entrega também possui uma propriedade transitiva, que se baseia na seguinte observação: se um nó a encontra um nó b frequentemente, e o nó b encontra frequentemente um nó c , logo o nó c provavelmente é um bom nó para encaminhar mensagens destinadas para a .

Uma constante β , onde $\beta \in \mathbb{R} \mid 0 \leq \beta \leq 1$, é utilizada para definir o impacto da transitividade na entrega. Quando um nó recebe a lista do vizinho, ele calcula a probabilidade de entrega para cada uma das mensagens que ainda não possui armazenada. Em seguida, para cada mensagem, o nó compara a probabilidade indicada na sua lista com a probabilidade indicada na lista recebida do vizinho. Essa comparação é realizada para verificar qual dos dois nós possui a maior probabilidade de entrega. Feita essa comparação, devem ser realizados três procedimentos:

1. o nó deve enviar um pedido das mensagens não armazenadas que possuem uma maior probabilidade de serem entregues por ele;
2. no momento em que recebe o pedido de mensagens do vizinho, ele as envia;
3. apaga do *buffer* todas as mensagens que o vizinho tem maior probabilidade de entregar.

Ao final dos três procedimentos cada nó ficará apenas com as mensagens cujas probabilidades de entrega sejam maiores através dele. Os resultados das simulações demonstram que o P Ro PHET é capaz de entregar mais mensagens que o *Epidemic* com uma sobrecarga de comunicação menor, especialmente quando o alcance de comunicação dos nós é pequeno. Isso deve-se ao fato do P Ro PHET enviar mensagens somente para os melhores nós, enquanto o *Epidemic* envia mensagens para todos os nós com quem encontra (LINDGREN; DORIA; SCHELÉN, 2003).

5.1.2.3 MaxProp

O *MaxProp* (BURGESS et al., 2006) propõe a utilização do histórico de contatos entre os nós como métrica para determinar a melhor maneira de encaminhar mensagens pela rede. Para que tal procedimento seja possível cada nó possui um vetor denominado *delivery likelihood*, com objetivo de armazenar o custo necessário para que cada destinatário seja alcançado. O cálculo do custo é baseado na frequência com que os contatos

entre os nós ocorrem. Quando dois nós se encontram eles trocam entre si seus vetores *delivery likelihood*, com intuito de recalculando o menor caminho para cada destinatário.

O *MaxProp* transmite, primeiramente, as mensagens que possuem o maior número de *hops* (saltos) percorridos, assumindo que o tamanho do *buffer* para mensagens originadas pelo próprio nó é ilimitado e que o tamanho do *buffer* para mensagens transmitidas por outros nós é limitado. Dentro dessa metodologia, caso ocorra um *overflow*, as mensagens que possuem menor probabilidade de serem entregues serão descartadas primeiramente.

Ele utiliza, ainda, uma técnica de notificação para remover dados antigos do *buffer*, onde uma mensagem de confirmação de entrega ao destino é replicada a todos os nós quando uma mensagem é entregue ao seu destino. No que diz respeito a experimentos, o *MaxProp* foi comparado com três algoritmos: *Oracle-based Dijkstra*, *Drop-Least Encountered* e o *Roteamento Aleatório*. Ele apresentou um maior número de mensagens entregues com menor tempo de atraso (BURGESS et al., 2006).

Apesar dos bons resultados obtidos pelo *MaxProp* para as métricas de taxa de entrega e tempo médio de atraso, ele produz um grande número de transmissões, assim como os algoritmos baseados em *Flooding*, o que leva a um alto *overhead* para largura de banda, espaço em *buffer* e consumo de energia.

5.1.2.4 NECTAR

O *Neighborhood Contact History – NECTAR* (OLIVEIRA; ALBUQUERQUE, 2009) também propõe a utilização do histórico de contatos para definir como o encaminhamento das mensagens deve ocorrer. Seu modelo utiliza um parâmetro denominado *Neighborhood Index* — NI, ele é calculado com base nos contatos efetuados, mais especificamente na frequência e duração com que eles acontecem. Em outras palavras, quanto maior o tempo de duração e mais frequentes os contatos, maior será o valor do *Neighborhood Index*.

O parâmetro *Neighborhood Index* considera o envelhecimento dos contatos como métricas para o seu cálculo. Quando dois nós param de se encontrar o valor do NI é reduzido; além do envelhecimento dos contatos o *NECTAR* também considera a distância entre dois nós para computar o NI. A distância é calculada pelo número de saltos necessários (nós intermediários) para que a mensagem vá do nó atual até o nó que deseja-se saber a distância. A utilização do parâmetro NI, baseado nestas duas métricas, permite que as mensagens sejam encaminhadas para os nós que estão próximos ao destino ou que

tiveram contato recente com o mesmo.

O *NECTAR* também utiliza, quando algumas premissas são satisfeitas, o modelo de disseminação epidêmico. Nesta fase mensagens são replicadas pela rede, assim como acontece com a estratégia Epidêmica. Contudo, essas mensagens só serão armazenadas pelos nós caso a capacidade de armazenamento deles seja superior a um valor mínimo pré-determinado. O *NECTAR* utiliza ainda, como metodologia para controle do uso de armazenamento, o descarte de mensagens mais antigas, mantendo as mais novas que foram repassadas a uma quantidade menor de nós. Também é utilizado um mecanismo de controle sobre a quantidade de cópias de mensagens transmitidas.

No que diz respeito a experimentos e resultados, o *NECTAR* foi submetido a diferentes cenários conjuntamente com as estratégias *Epidemic Routing* e *PRoPHET*. Ele apresentou resultados superiores aos dois para o número médio de mensagens entregues. Ele ainda foi superior ao *Epidemic* na quantidade de transmissões efetuadas, mas acabou sendo inferior ao *PRoPHET* em cenários que apresentavam maior capacidade de armazenamento. o *NECTAR* também conseguiu definir rotas mais adequadas para o encaminhamento das mensagens, visto que necessitou de um menor número de saltos para chegar até o seu destino (OLIVEIRA; ALBUQUERQUE, 2009).

5.1.3 Análise Comparativa e Contribuição das Estratégias

Uma análise comparativa entre as estratégias de roteamento apresentadas nas seções 5.1.1 e 5.1.2, considerando as técnicas de roteamento utilizadas que influenciam as métricas de avaliação do ambiente DTN, é apresentada a tabela 1. Nela é possível compreender o comportamento dos algoritmos no que diz respeito: ao histórico de dados no qual se baseiam; à quantidade de réplicas de mensagens espalhadas pela rede; e à abordagem de encaminhamento de mensagens utilizada.

A estratégia de roteamento epidêmica (*Epidemic Routing*) apresenta, como principal contribuição, o uso da replicação de mensagens como metodologia para aumentar a taxa de entrega e diminuir o tempo médio de atraso. Entretanto, o uso da replicação de mensagens sem alguma técnica de controle sobre o número de cópias distribuídas, faz com que os recursos de rede (comunicação, armazenamento, energia) sejam consumidos rapidamente, provocando rápida perda de desempenho. Em contrapartida ao *Epidemic*, a estratégia *Spray and Wait* propõem um controle simples para a quantidade de cópias das mensagens propagadas pela rede, onde apenas um número x de cópias para cada mensagem pode ser distribuída.

Tabela 1: Análise comparativa: estratégias de roteamento projetadas para o ambiente DTN.

PROTOCOLO	HÍSTÓRICO DE DADOS UTILIZADO	NR. DE CÓPIAS/ ENCAMINHAMENTO	OBJETIVO
Epidemic	Lista de nós com os quais esteve conectado ultimamente	Ilimitado/ Não Controlado	Maximizar a propagação de mensagens, otimizando a taxa de entrega e o atraso
Spray And Wait	Não utiliza	Limitado/ Não Controlado	Limitar o número de cópias de mensagens que são geradas
Shortest Path	Tabela com as probabilidades de contato de todos os nós da rede	Ilimitado/ Controlado	Determinar as menores rotas de entrega
PRoPHET	Vetor com as probabilidades de entrega das mensagens para cada um dos nós	Ilimitado/ Controlado	Determinar os nós com maior probabilidade de entrega
MaxProp	Tabela com as probabilidades de contato com outros nós da rede	Ilimitado/ Controlado	Encontrar a menor rota baseado no custo
NECTAR	Tabela de índices – calculados a partir do tempo de duração e frequência dos contatos	Ilimitado/ Controlado	Aumentar a taxa de entrega evitando o consumo excessivo de recursos

Essa abordagem mostrou-se eficiente quando comparada ao *Epidemic*, mantendo a taxa de entrega ao longo do tempo por ser capaz de prover roteamento sem consumir rapidamente os recursos de rede. Considerando tais contribuições a estratégia de roteamento proposta nesta tese também utiliza, em sua concepção, a replicação de mensagens, assim como adota uma técnica de controle de réplicas baseada no modelo de previsão sobre a localização proposto na seção 6.1.2.

As estratégias baseadas em disseminação probabilística propõem a utilização de dados disponíveis no ambiente DTN (número de contatos, tempo de duração de contato, localização do contato, momento do contato) que podem ser armazenados e trocados entre os nós ao longo do tempo. Tendo como base essas informações são construídos modelos estatísticos que permitem prever a probabilidade de dois ou mais nós estarem em contato num momento futuro. Essa abordagem possibilita estimar as melhores rotas de entrega e determinar quais nós são capazes de entregar cada uma das mensagens que estão sendo roteadas. Neste contexto, os algoritmos probabilísticos são capazes de otimizar o uso dos recursos de rede e obter melhores resultados, como taxa de entrega mais elevada e *overhead* mais baixo.

Os dados armazenados (tabelados) e compartilhados pelos nós, durante os contatos efetuados ao longo do tempo, permitem que modelos matemáticos sejam construídos, tendo como finalidade analisar e obter conhecimento a partir das informações coletadas. Através da utilização dessa abordagem (histórico de encontros), mas aplicada a resolução dos desafios do ambiente veicular, a estratégia de roteamento apresentada na seção 6 propõem a construção de um modelo de previsão para a localização dos veículos. Esse modelo permite que estratégias de roteamento baseadas na localização dos nós funcionem em cenários onde serviços externos de localização não existem ou estão indisponíveis por um determinado período de tempo.

5.2 Roteamento em Redes Veiculares

As Redes Veiculares ad hoc possuem similaridades com outras redes ad hoc no que diz respeito ao raio de transmissão curto, auto-organização, auto-gerenciamento e baixa taxa de transmissão. Entretanto, elas também possuem um conjunto de peculiaridades – topologia de rede altamente dinâmica, densidade não-uniforme de veículos; previsibilidade sobre a rota veicular e energia/recursos suficientes – que torna as estratégias de roteamento tradicionais não-aplicáveis ao ambiente VANET (LI; WANG, 2007).

Devido a essas características muitas estratégias têm sido propostas para as Redes Veiculares, e podem ser divididas em cinco categorias: roteamento baseado em topologia, roteamento baseado em posição, roteamento sensível ao tráfego, roteamento baseado em *cluster*, e roteamento baseado em *broadcast*. Uma análise das literaturas mais relevantes, como a proposta por Liu e Wan (LIU et al., 2016), mostram que, com exceção de algumas estratégias de roteamento tradicionais baseadas na topologia da rede, as estratégias baseadas na posição dos veículos e em mapas digitais apresentam os melhores resultados. Considerando essas informações, a estratégia de roteamento proposta nesta tese busca modelar um algoritmo baseado na posição dos veículos que seja capaz de superar os principais desafios do ambiente veicular como, por exemplo, o desenvolvimento de um modelo matemático capaz de estimar a localização dos veículos sem a assunção sobre a existência de serviços e infraestruturas externas.

As estratégias de roteamento projetadas para as redes veiculares podem ser divididas em dois grupos: roteamento para redes veiculares totalmente conectadas (*VANET*), e roteamento para redes veiculares tolerantes a atrasos (*VDTN*). As estratégias projetadas para o ambiente *VANET* assumem a existência de uma quantidade suficientemente grande de veículos que permite manter a rede totalmente conectada, sendo capazes de fornecer comunicação fim-a-fim entre quaisquer nós da rede e a qualquer momento (LI; WANG, 2007). Todavia, essas estratégias não se aplicam quando a rede veicular torna-se esparsa (baixo tráfego de veículos) e as conexões fim-a-fim já não podem mais ser estabelecidas (KURHINEN; JANATUINEN, 2008). Para superar esse desafio, algoritmos projetados para *VANET* esparsa utilizam o paradigma das Redes Tolerantes a Atrasos (*DTN*) dentro do ambiente veicular com intuito de suportar as frequentes desconexões e particionamentos de rede (KANG et al., 2015).

5.2.1 Arquitetura e Encaminhamento

A implantação de arquiteturas baseadas em veículos conectados compreende cenários ricos em padrões de comunicação, tais como veículo a veículo (V2V) e veículo a infraestrutura (V2I) (por exemplo, WI-FI, LTE, Unidades Laterais – RSUs, semáforos inteligentes). Devido aos altos níveis de mobilidade, as topologias de rede resultantes são muito dinâmicas, caracterizadas por desconexões frequentes e longos atrasos de comunicação entre os veículos. Em redes veiculares tolerantes a atrasos, algoritmos que requerem decisões de roteamento local em cada fase de retransmissão de mensagens são comumente usados, uma vez que eles produzem caminhos de roteamento próximos ao

ideal, ao mesmo tempo que requerem muito poucos recursos de rede e nó. Esses algoritmos são denominados *gulosos* (*greedy*). Uma análise cuidadosa da literatura mostra que, à exceção de alguns algoritmos de roteamento tradicionais, baseados na topologia da rede, as melhores estratégias de roteamento são aquelas que baseiam-se na localização dos veículos (mapa digital) e utilizam algoritmos gulosos para adaptar-se à topologia altamente dinâmicas das redes veiculares (LIU et al., 2016).

A tabela 2 apresenta uma análise comparativa entre o desempenho dos algoritmos utilizados pelas principais estratégias de roteamento baseadas na localização.

Tabela 2: Comparação entre as estratégias de roteamento.

FASE	ESTRATÉGIA	OVERHEAD	LATÊNCIA
Seleção do Caminho	Sem seleção de caminho	Nenhum	Alto
	Todo o caminho usando Dijkstra	Alto	Médio
	Próximo Cruzamento	Baixo	Baixo ou Médio (métrica)
Encaminhamento	Guloso	Baixo	Baixo
	Guloso ao longo do caminho	Baixo ou Alto (caminho)	Baixo
	Guloso Restrito	Baixo	Médio

Fonte: (FONSECA; VAZÃO, 2013).

A estratégia de seleção de caminho é um fator chave para que os algoritmos obtenham bom desempenho, já que influencia, positiva ou negativamente, as métricas de *overhead* e latência. Uma abordagem de seleção total do caminho usando Dijkstra, por exemplo, apresenta *overhead* alto e *latência* média. O alto *overhead* está relacionado com fato de que todo o caminho de roteamento a ser percorrido é inserido na mensagem desde sua origem, ou seja, quanto mais complexo for o caminho, maior será o *overhead* dessa estratégia (FONSECA; VAZÃO, 2013).

Em contrapartida, a seleção de caminho baseada no próximo cruzamento apresenta *overhead* baixo e *latência* baixa ou média, dependendo da métrica utilizada na escolha do próximo cruzamento. Sendo assim, a estratégia de roteamento proposta nesta tese utiliza a abordagem *próximo cruzamento* como estratégia de *seleção do caminho*. No que diz respeito à fase de encaminhamento, foi adotada, como estratégia, o *encaminhamento guloso*; onde o próximo cruzamento, pelo qual a mensagem deve trafegar, é escolhido a cada salto.

5.2.2 Estratégias de Roteamento Baseadas em Posição – VANET

As seções 5.2.2.1 – 5.2.2.5 apresentam as estratégias de roteamento baseadas em posição projetadas para o ambiente veicular que estão alinhadas com a tese de doutorado proposta nesse documento.

5.2.2.1 Roteamento Guloso de Perímetro ou *GPSR*

O *GPSR* (KARP; KUNG, 2000) é um algoritmo de roteamento clássico baseado em posição que utiliza a localização dos nós vizinhos, a localização do veículo de destino e própria localização (do nó que possui a custódia da mensagem) para tomar decisões sobre o encaminhamento das mensagens. Seu objetivo principal é encontrar as menores rotas de entrega. Ele toma decisões de encaminhamento gulosas utilizando apenas informações sobre vizinhos imediatos dentro da topologia de rede, como pode ser visto na Figura 17a – onde o veículo de origem S encaminha as mensagens para y que é o vizinho mais próximo do destino D . O círculo representa a área de cobertura do veículo S .

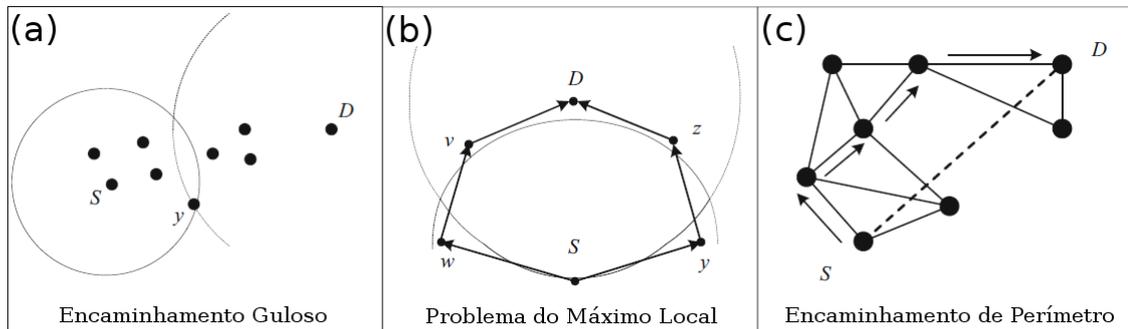


Figura 17: Estratégia de Encaminhamento *GPSR*.

Fonte: (KARP; KUNG, 2000) – Adaptado.

A figura 17b mostra o problema do máximo local, quando o veículo S não pode encontrar outro veículo que esteja mais próximo do destino D em sua vizinhança. Em outras palavras w e y estão dentro da área de cobertura de S mas fora da área de cobertura de D . Nesse caso, quando o encaminhamento guloso não é possível, o algoritmo proposto pelo *GPSR* se recupera utilizando o roteamento de perímetro como apresentado na Figura 17c. O roteamento de perímetro faz uso da regra da mão direita para encontrar um perímetro em torno da linha de $S \rightarrow D$ e, em seguida, as mensagens são encaminhadas a partir de S pelo trajeto das setas, em torno do plano adjacente à linha de $S \rightarrow D$.

A principal vantagem do *GPSR* consiste em utilizar o conhecimento geográfico sobre seus vizinhos. Quando um veículo executando o algoritmo *GPSR* está encaminhando

uma mensagem ele seleciona como próximo salto o veículo vizinho que está geograficamente mais próximo do destino. A estratégia do *GPSR* mostra-se pouco eficiente quando é aplicada num ambiente urbano, devido à natureza altamente dinâmica das VANETs. Em outras palavras, o *GPSR* faz uma análise simples sobre a localização dos nós, ignorando informações importantes para o ambiente veicular como a velocidade e a direção de deslocamento dos veículos.

5.2.2.2 Roteamento Geográfico de Origem ou *GSR*

O *GSR* (LOCHERT et al., 2003) é uma estratégia de roteamento voltada especificamente para o ambiente urbano que possui como objetivo encontrar as menores rotas de encaminhamento das mensagens. O *GSR* assume que os veículos são equipados com dispositivos *GPS* e mapas digitais urbanos, permitindo que uma posição precisa sobre os veículos e uma estrutura topológica das vias urbanas possam ser adquiridas do dispositivo de bordo. Ele propõe ainda superar as deficiências de encaminhamento das estratégias baseadas em posição como, por exemplo, a desconexão da rede.

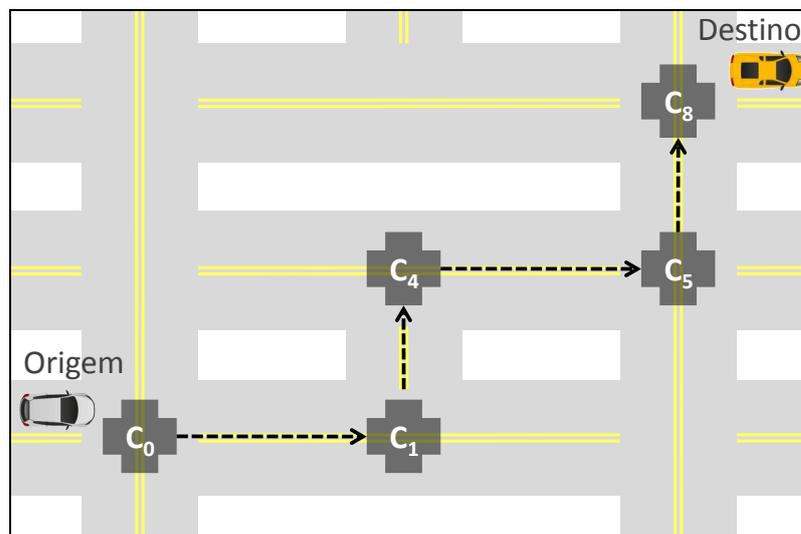


Figura 18: Estratégia de Encaminhamento *GSR*.

Fonte: (LOCHERT et al., 2003) – Adaptado.

O algoritmo proposto pelo *GSR* baseia-se num mapa digital, na posição do nó de origem e na posição do nó de destino para calcular/determinar qual veículo deve ser escolhido, num determinado cruzamento de vias, como próximo salto da mensagem. Ele também considera a existência de um serviço de localização global que informa, sempre que necessário, a posição atualizada sobre o veículo de destino. O nó de origem, para uma mensagem, utiliza um mapa digital/global de ruas para calcular, via algoritmo de

Dijkstra, o caminho mais curto (composto por uma sequência de cruzamentos: $C_0 \rightarrow C_1 \rightarrow C_4 \rightarrow C_5 \rightarrow C_8$) até o destino, como pode ser visto na Figura 18.

A principal desvantagem do *GSR* é que o caminho mais curto nem sempre é o caminho ideal, uma vez que ele não considera o tráfego de veículos na rua. Sendo assim, seu algoritmo apresenta um alto *overhead*, visto que ao definir o caminho que a mensagem deve seguir o *GSR* deve agregá-lo a mensagem antes de retransmiti-la ao próximo veículo para que o mesmo tome ciência do caminho e dê continuidade ao roteamento. Além disso, como possui um mecanismo de seleção de cruzamento estático, ele apresenta fraco desempenho quando as redes são altamente dinâmicas (BILAL; BERNARDOS; GUERRERO, 2012).

5.2.2.3 Roteamento Guloso Consciente sobre o Tráfego ou *GyTAR*

O *GyTAR* (JERBI et al., 2006) é uma estratégia de roteamento geográfica baseada nos cruzamento de vias projetado para operar em ambiente urbano, onde apresenta bom desempenho. Ele presume que um sistema de navegação (*GPS* + mapa global digital de vias) está disponível, onde mapas e informações de trânsito podem ser exploradas para definir como as mensagens devem ser retransmitidas. O *GyTAR* supõe também que a posição atual do veículo de destino é conhecida com antecedência e que os nós possuem a capacidade de manter uma tabela de vizinhos através de pacotes *Hello*.

Sua estratégia busca dividir a área urbana em pequenas células, definindo um grupo e selecionando um veículo central destes grupos como seu líder. A partir disso informações de densidade de tráfego são calculadas pelos líderes e retransmitidas entre seus membros. Ao contrário da estratégia *GSR*, onde um veículo de origem calcula uma sequência estática de cruzamentos que a mensagem deve percorrer até alcançar seu destino, no *GyTAR* os cruzamentos intermediários são escolhidos de forma dinâmica e em sequência, levando em consideração a variação da densidade de tráfego veicular e a distância de curva métrica até o destino. A Figura 19 apresenta um exemplo sobre o método de seleção de cruzamento proposto pelo *GyTAR*.

Nela o algoritmo possui três possibilidades de escolha (C_0 , C_4 e C_6) e acaba selecionando o cruzamento C_4 tendo como base suas distâncias de curva métrica para o destino e a densidade de tráfego. A estratégia proposta pelo *GyTAR* apresenta uma melhora significativa dentro dos ambientes urbanos. Todavia, o ele possui uma limitação importante, ele não considera a direção dos veículos dentro do seu mecanismo de roteamento, ou seja, um cruzamento pode ser selecionado por possuir maior tráfego de veículos, porém todos

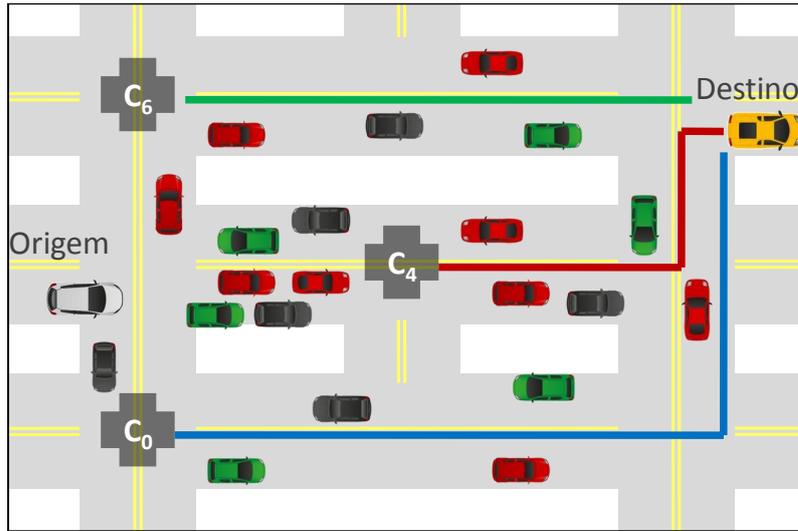


Figura 19: Estratégia de Encaminhamento *GyTAR*.

Fonte: (JERBI et al., 2006) – Adaptado.

os veículos podem estar se movendo para longe do destino.

5.2.2.4 Roteamento Veicular Direcional Baseado em Posição ou *PDVR*

O *PDVR* (TIAN; SHAFIEE; LEUNG, 2009) é uma estratégia de roteamento que tem por objetivo garantir a entrega das mensagens através da descoberta de rotas eficientes. Ele assume que os veículos são equipados com receptores *GPS* e podem adquirir de maneira precisa sua posição e velocidade. O *PDVR* considera que alta mobilidade dos veículos afeta a comunicação em *VANET*, e por isso tem por objetivo certificar-se que as mensagens podem ser entregues aos seus destinos através de rotas eficientes e estáveis.

Ele adota e combina dois métodos ou critérios de seleção para o próximo veículo que receberá a mensagem: (1) o veículo deve estar trafegando na mesma direção do veículo de origem; (2) o veículo deve estar indo, de maneira geral, na direção do destino. Como mostrado na Figura 20, sendo o vetor de direção da estrada é $R = rx_i + ry_j$, a posição de origem é $S(sx, sy)$, a posição de destino é $D(dx, dy)$, seus vetores são $\overrightarrow{SD} = (dx - sx)i + (dy - sy)j$, $\overrightarrow{SN} = (nx - sx)i + (ny - sy)j$, ele assume que a posição do nó que será o próximo salto para a mensagem é $N(nx, ny)$, então o $\cos(\alpha) = (\overrightarrow{SD} \cdot R) / (|\overrightarrow{SD}| \cdot |R|)$ e $\cos(\beta) = (\overrightarrow{SN} \cdot R) / (|\overrightarrow{SN}| \cdot |R|)$ podem ser derivados. Um vizinho será selecionado como próximo salto apenas quando $\cos(\alpha) \cdot \cos(\beta) \geq 0$. Portanto, de acordo com o algoritmo da estratégia *PDVR*, o nó N é um nó apropriado para o ser o próximo salto, enquanto o nó N' é inadequado.

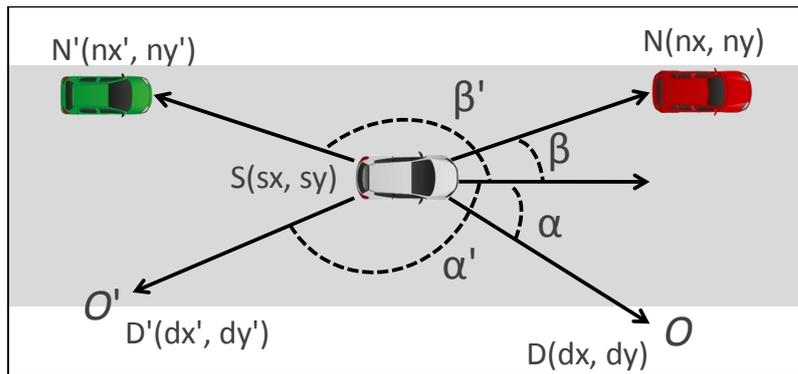


Figura 20: Estratégia de Encaminhamento *PDVR*.

Fonte: (LIU et al., 2016) – Adaptado.

Os critérios de seleção utilizados pelo *PDVR* mostram-se parcialmente eficazes, obtendo bom desempenho apenas quando as rotas dos veículos são retilíneas. A performance do seu algoritmo cai consideravelmente quando exposto a ambientes que apresentem curvas acentuadas como cruzamentos. Em outras palavras, o *PDVR* mostra-se pouco eficaz quando utilizado em ambientes urbanos.

5.2.2.5 Roteamento Guloso Direcional ou *DGR*

O *DGR* (BILAL; BERNARDOS; GUERRERO, 2012) é uma estratégia de roteamento baseada na posição voltado a comunicação veículo-a-veículo em ambiente aberto. Ele tem por objetivo otimizar o atraso e a taxa de entrega das mensagens. O *DGR* utiliza o *GPS*, juntamente com mapas estáticos, no intuito de obter a posição dos veículos. Ele assume também a existência de um serviço de localização global que permite adquirir, sempre que necessário, a posição dos veículos de destino.

O *DGR* pressupõe ainda que cada veículo é capaz de adquirir a sua velocidade e direção diretamente dos sensores disponíveis na unidade de bordo. O critério de escolha do próximo veículo que receberá a mensagem é baseado na proximidade do mesmo em relação ao destino e se está viajando na mesma direção. O nó que será escolhido como próximo salto é selecionado através da equação 5.1:

$$wi = \alpha(1 - D_i/D_c) + \beta \cos(\vec{V}_i, \overrightarrow{Pi, d}) \quad (5.1)$$

Onde D_i é a menor distância do veículo i em relação ao destino, D_c é a menor distância do veículo de origem em relação ao destino, \vec{V}_i é o vetor que representa a

velocidade do nó i e o vetor $\overrightarrow{Pi, \hat{d}}$ representa a posição do nó i em relação ao destino. A primeira parte da fórmula $(1 - D_i/D_c)$ representa a proximidade do veículo para o destino considerando que os valores do *cosse*no dos dois vetores representam a direção de movimento do veículo. Os parâmetros α e β são utilizados pela estratégia para satisfazer condições ambientes.

O *DGR* mostrou bom desempenho em ambientes onde os veículos trafegam de maneira retilínea (auto-estradas), mas assim como *PDVR* são necessárias algumas adaptações em seu modelo para que seja possível manter sua performance em ambientes com a presença de cruzamentos (urbanos), onde os carros mudam de direção com certa frequência.

5.2.3 Estratégias de Roteamento Baseadas em Posição – VDTN

As seções 5.2.3.1 – 5.2.3.4 apresentam as estratégias de roteamento baseadas na posição dos veículos, projetadas para o ambiente VDTN e que estão alinhadas com a tese de doutorado proposta nesse documento.

5.2.3.1 Roteamento Geográfico Oportunista ou *GeoOpps*

O *GeoOpps* (LEONTIADIS; MASCOLO, 2007) é uma estratégia de roteamento geográfico² baseada na informação sobre localização do veículo. Ele tem por objetivo melhorar o desempenho das estratégias de encaminhamento que utilizam o método de cópia única em VDTN. O *GeoOpps* explora a geo-localização dos veículos para encaminhar mensagens de maneira oportunista na direção do local onde o destino final se encontra. O veículo que está se deslocando para perto da posição do destino é escolhido como próximo nó a transportar a mensagem.

O ponto, para onde está se deslocando o veículo que foi escolhido para transportar a mensagem, é denominado *ponto mais próximo* ou *PmP*. Ele é usado para computar o *tempo mínimo estimado para entrega* ou *METD*, a partir da equação 5.2, onde T_r é o tempo restante para que o veículo alcance o ponto mais próximo e V_m é a sua velocidade média.

$$METD = PmP + \frac{T_r}{V_m} \quad (5.2)$$

O veículo que apresenta o menor *METD* é escolhido como próximo salto para

²As estratégias de roteamento geográfico, baseadas na localização dos nós, são consideradas abordagens promissoras de encaminhamento de mensagens para redes veiculares (KANG et al., 2015).

transportar/carregar a mensagem que está sendo roteada. O *GeoOpps* assume que o veículo transportador da mensagem sempre encontra outro veículo quando alcança o *ponto mais próximo*. Em certas ocasiões, pode ser mais aconselhável transferir a mensagem para o veículo que está se movendo mais lentamente na direção do destino ao invés de transferir para o veículo que alcançará mais rapidamente o *ponto mais próximo*. Para determinar quando escolher uma ou outra situação, o *GeoOpps* atribui pesos que variam de acordo com a velocidade dos veículos e suas distâncias restantes até os pontos mais próximos.

Apesar do *GeoOpps* utilizar uma estratégia de roteamento promissora, baseada na localização dos nós, ele não considera algumas questões importantes: (1) ele assume que veículo transportador encontrará outro veículo quando atingir o seu *ponto mais próximo*, entretanto durante essa trajetória outros veículos em condições melhores de entrega são encontrados e desconsiderados, visto que o transportador só repassará a mensagem ao alcançar seu *PmP*; (2) ele não considera o deslocamento do veículo de destino (mudança de posição) durante o tempo que o transportador necessita para alcançar o *ponto mais próximo*, ou seja, é provável que o destino já esteja muito distante da localização utilizada como referência quando o *PmP* for atingido. O *GeoOpps* também assume a existência de um serviço capaz de fornecer, sempre que necessário, a localização do veículo de destino.

5.2.3.2 Roteamento Consciente da Distância com Controle de Cópia ou *DARCC*

O *DARCC* (LO; GAO; LO, 2012) é uma estratégia de encaminhamento baseada na posição dos veículos que tem por objetivo determinar qual nó deve receber uma cópia da mensagem que está sendo encaminhada. Os veículos executando a estratégia *DARCC* definem como a transmissão das mensagens deve ocorrer através de dois princípios:

1. Se a localização do destino é conhecida, a mensagem é transmitida para o veículo que está mais próximo do destino;
2. Se a localização do destino não é conhecida, cópias da mensagem são espalhadas em diferentes direções com intuito de aumentar a probabilidade de encontrar o destino;

A Figura 21 mostra o conceito proposto pelo *DARCC*. Ele assume que cada veículo é equipado com um receptor *GPS*, o que possibilita ao nó calcular seu vetor de movimento atual que representa sua velocidade e direção de movimento. Por exemplo, se o veículo vira à esquerda em um cruzamento, durante um determinado período de tempo t , o seu vetor de movimento no tempo t é calculado como uma seta, como visto na Figura 21.

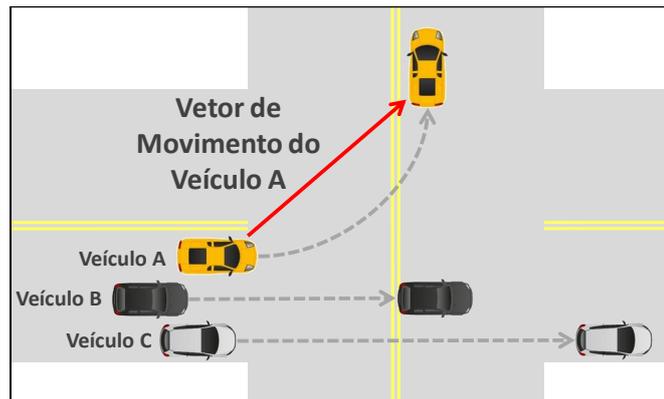


Figura 21: Estratégia de Encaminhamento *DARCC*.

Fonte: (LO; GAO; LO, 2012) – Adaptado.

A estratégia proposta pelo *DARCC* considera que cada veículo transmite periodicamente uma mensagem de *beacon* incluindo a sua localização, seu vetor de movimento atual e a lista de mensagens que possui. Quando os veículos estão se movendo em diferentes direções, a replicação de mensagens melhora o desempenho da taxa de entrega porque os veículos que carregam as cópias são capazes de alcançar o destino enquanto se movimentam. Como o *DARCC* utiliza a replicação ele conseqüentemente aumenta o consumo de recursos de rede. Em outras palavras, controlar a quantidade de mensagens replicadas é um problema significativo para a estratégia proposta, visto que quando a densidade da rede aumenta, o volume de réplicas aumenta consideravelmente, consumindo os recursos de comunicação.

5.2.3.3 Roteamento Adaptativo a Densidade com Nós Conscientes ou *DAWN*

O *DAWN* (FU et al., 2011) é uma estratégia de encaminhamento baseada na quantidade de veículos – densidade da rede. Assim como a dinâmica proposta pelo *DARCC* ele define como a transmissão das mensagens deve ocorrer através de dois princípios:

1. Quando a densidade da rede é baixa, a estratégia de encaminhamento proposta pelo *DAWN* utiliza-se do roteamento epidêmico para espalhar cópias das mensagens pela rede e aumentar a taxa de entrega;
2. Em contra partida, quando a densidade da rede aumenta, o *DAWN* opta por restringir as transmissões de mensagens com intuito de evitar que congestionamentos ocorram no canal de comunicação;

A Figura 22 apresenta o cenário assumido pela estratégia de roteamento proposta pelo *DAWN*.

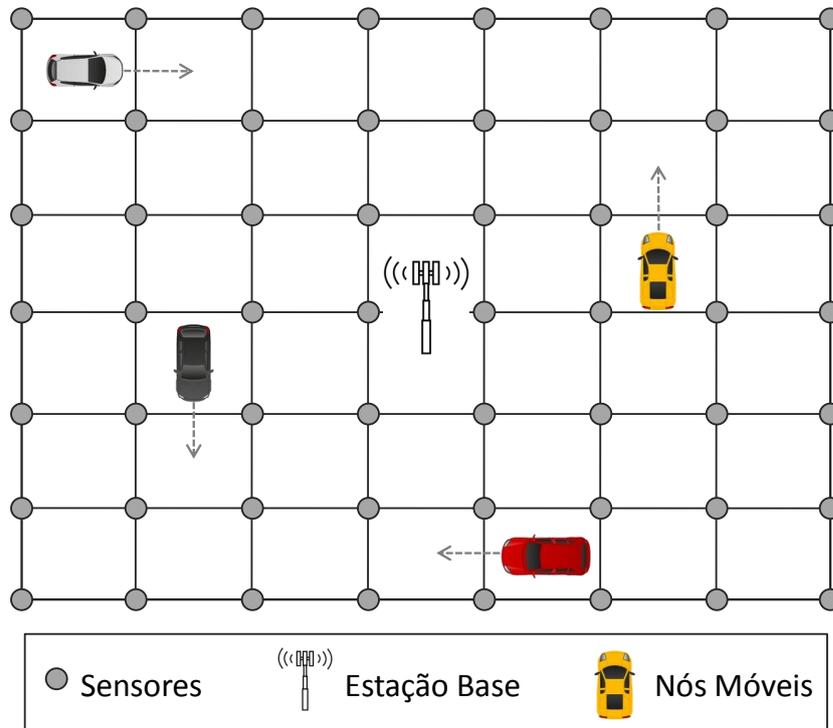


Figura 22: Estratégia de Encaminhamento *DAWN*.

Fonte: (FU et al., 2011) – Adaptado.

Os autores projetaram o *DAWN* para suportar aplicações de sensoriamento urbano. Sendo assim, conforme mostrado na Figura 22, os autores consideram a existência de N sensores fixos ao longo das vias juntamente com uma estação base central de coleta dos dados sensorizados. Os dados são gerados nos sensores e cada mensagem inclui sua localização de origem e o momento (horário) da geração, e os veículos são nós móveis viajando pelas células. No momento que os veículos se deslocam para uma nova célula eles coletam as mensagens contendo os dados dos sensores e a armazenam em seu *buffer*. Quando dois veículos se encontram, eles replicam suas mensagens entre si.

O *DAWN* introduz, ainda, um conceito denominado Valor Incremental Utilitário (*VIU*), que possibilita atribuir prioridade às mensagens. Aquelas que possuem maior *VIU* devem ser transmitidas com maior prioridade. A *VIU* é estimada por cada veículo para maximizar a probabilidade de que as mensagens sejam entregues para a estação base antes que um espaço sem comunicações aconteça. Em contrapartida ao *DARCC* a estratégia proposta pelo *DAWN* busca reduzir a replicação de pacotes evitando o congestionamento do canal de comunicação. Entretanto seu desempenho é apenas um pouco superior ao

apresentado pelo *DARCC*.

5.2.3.4 Roteamento de Spray Geográfico para VDTN ou *GeoSpray*

A estratégia de roteamento proposta pelo *GeoSpray* (SOARES; RODRIGUES; FARAHMAND, 2014) baseia-se nos princípios de cópia única e caminho único propostos pelo *GeOpps* para fornecer uma abordagem de roteamento de mensagens multi-cópia e multi-caminho. O *GeoSpray* optou pelo uso de uma técnica multi-cópia porque elas são reconhecidas na literatura por apresentarem altas taxas de entrega de mensagens e baixos atrasos. Entretanto, técnicas que utilizam replicação de mensagens também produzem altos custos devido a grande quantidade de cópias que são duplicadas pela rede.

O *GeoSpray* adota a abordagem de replicação do protocolo *Spray and Wait* (SPYROPOULOS; PSOUNIS; RAGHAVENDRA, 2005) para limitar o número de cópias. Inicialmente, ele usa um esquema multi-cópia para espalhar um número limitado de cópias das mensagens com intuito de explorar os diversos possíveis caminhos de entrega. Após o término da etapa multi-cópia o *GeoSpray* muda sua estratégia de roteamento para um esquema de encaminhamento cópia única. Ele também utiliza uma técnica que permite remover as mensagens que já foram entregues do *buffer* de armazenamento dos veículos. Ele propaga pacotes contendo informações sobre as mensagens que já foram entregues.

Assim como as principais estratégias de roteamento projetadas para o ambiente veicular, o *GeoSpray* pressupõe a existência de um serviço de localização global que permite aos nós obter a localização atualizada de qualquer veículo de destino. Os autores consideram que esse serviço de localização é capaz de determinar a posição corrente dos veículos através de informações recebidas de receptores GPS, mapas de correspondência, processamento de imagens, processamento de vídeos e sistemas de localização.

Durante os experimentos efetuados o *GeoSpray* alcançou taxa de entrega e tempo médio de atraso melhores que os obtidos pelo *GeOpps*, ao mesmo tempo que produziu uma maior sobrecarga e consumo de recursos de rede causados pela alta replicação de mensagens. No entanto, essa sobrecarga foi menor que a produzida pela estratégia epidêmica.

5.2.4 Análise Comparativa e Contribuição das Estratégias

No intuito de obter uma visão comparativa sobre as estratégias de roteamento apresentadas nas seções 5.2.2 e 5.2.3, considerando as técnicas de encaminhamento que influenciam as principais métricas de avaliação para o ambiente veicular, foi produzida a

tabela 3. Nela é possível compreender o comportamento desses algoritmos com relação: a métrica de encaminhamento utilizada; a dependência de infraestruturas externas e serviços de localização. Além disso, também são apresentados os objetivos de cada um dos modelos de roteamento utilizados.

Os algoritmos propostos para o ambiente veicular totalmente conectado (VANET) utilizam, além da localização dos veículos, outras informações complementares como velocidade, direção de deslocamento, mapas digitais e densidade de tráfego. Essas informações são utilizadas pelas estratégias como parâmetros que possibilitam determinar as melhores rotas de entrega e os veículos que devem transportar as mensagens até o seu destino. Além disso, por se tratarem de algoritmos baseados na localização dos nós, todas as estratégias assumem que a localização dos veículos podem ser obtidas, sempre que necessário, através de infraestruturas e serviços externos. Os objetivos das estratégias VANET, de maneira geral, estão centrados na definição de rotas de encaminhamento eficientes que possibilitem otimizar a taxa de entrega e diminuir o tempo médio de atraso.

Em contrapartida, algoritmos propostos para o ambiente veicular tolerante a atrasos (VDTN) baseiam-se, em sua grande maioria, em infraestruturas externas que permitam auxiliar a comunicação e transmissão de dados no ambiente veicular. As estratégias VDTN visam, além de fornecer de um mecanismo de roteamento tolerante a atrasos e desconexões, diminuir o *overhead* e otimizar o uso do canal de transmissão através da redução da replicação de mensagens. Assim como os algoritmos de roteamento VANET, elas tem por objetivo otimizar a taxa de entrega e diminuir médio de atraso.

A partir das informações compiladas na tabela 3 e das técnicas propostas pelas estratégias de roteamento veiculares (seções 5.2.2.1 – 5.2.3.4), tem-se como contribuição no desenvolvimento do algoritmo de roteamento proposto nesta tese (*V-SPORT*):

- *Proximidade*: o uso de informações sobre a proximidade dos veículos em relação ao destino, proposto pelo *GPSR*, *GeoOpps* e *DARCC* é uma metodologia adotada e otimizadas pelo *V-SPORT*. Além de considerar o quão próximos os nós se encontram do destino, são utilizados como parâmetros, também, a velocidade e direção de deslocamento dos veículos, como apresentado pelo *DRG*. Essa abordagem permite identificar se, apesar de próximos, os veículos estão distanciando-se ou não do destino.

Tabela 3: Análise comparativa: estratégias de roteamento projetadas para o ambiente veicular.

ESTRATÉGIA	MÉTRICA DE ENCAMINHAMENTO	ASSUME QUE A LOCALIZAÇÃO DO DESTINO É CONHECIDA?	OBJETIVO
GPSR	Localização do Destino, Vizinhos e Origem	Sim	Encontrar as menores rotas de encaminhamento
GSR	Localização do Destino e Origem - Mapa Digital	Sim	Encontrar as menores rotas de encaminhamento
GyTAR	Localização do Destino, Densidade do Tráfego Veicular e Mapa Digital	Sim	Otimizar o Roteamento em Ambientes Urbanos
PDVR	Localização, Velocidade e Direção dos Veículos	Sim	Grantir a entrega descobrindo rotas eficientes
DGR	Localização, Velocidade e Direção dos Veículos	Sim	Otimizar o Atraso e Taxa de Entrega
	MÉTRICA DE ENCAMINHAMENTO	BASEADO EM INFRAESTRUTURA?	OBJETIVO
GeoOpps	Densidade da Rede	Sim	Otimizar a taxa de entrega, o atraso e o overhead
DARCC	Localização do Destino e Direção de Movimento dos Nós	Sim	Reduzir a replicação de mensagens
DAWN	Densidade da Rede	Não	Otimizar o uso do canal de transmissão e recepção
GeoSpray	Densidade da Rede e Diferença no Tamanho da Mensagens	Sim	Otimizar a taxa de entrega com atraso mínimo

- *Aproximação e Rotas de Entrega*: a definição de rotas de entrega ou aproximação, proposto pelo *GSR*, também foi adotada. Para o *V-SPORT*, a definição das rotas de entrega acontece de maneira dinâmica, assim como a metodologia proposta pelo *GyTAR*. Em outras palavras, os cruzamentos são escolhidos a cada salto da mensagem, o que permite reduzir consideravelmente o *overhead*. Como melhoria ao *GyTAR*, são consideradas, no momento da escolha dos cruzamentos que compõem a rota de entrega, as direções de deslocamento dos veículos (*PDVR*).
- *Replicação de mensagens*: a replicação de mensagens, que possibilita aumentar a taxa de entrega, também é adotada pelo *V-SPORT*, assim como proposto pelo *DARCC* e *DAWN*. Entretanto, para evitar congestionamento do canal de transmissão o *V-SPORT* adota a técnica de controle de cópias proposta pelo *GeoSpray*. Essa abordagem permite melhorar a taxa de entrega sem comprometer o canal de transmissão quando a densidade de rede aumenta.

5.3 Considerações Finais

A utilização do histórico de encontros, onde informações sobre os veículos contactados são armazenadas e compartilhadas entre os nós, permite que modelos matemáticos sejam construídos para dar suporte às estratégias de roteamento tolerantes a atrasos e desconexões. Essa abordagem possibilita, aos algoritmos DTN, prever se dois ou mais nós estarão em contato num momento futuro (*SEPR* e *MaxProp*) e também estimar a probabilidade de entrega que cada nó possui (*PRoPHET* e *NECTAR*). A partir das informações produzidas por esses modelos, as estratégias de roteamento definem como o encaminhamento das mensagens deve ocorrer.

Em contrapartida, os algoritmos de roteamento projetados para o ambiente veicular, baseados na localização dos veículos, utilizam a posição do destino como métrica fundamental para definir as rotas pelas quais as mensagens devem trafegar até serem entregues. Estudos de revisão recentes, como proposto em (LIU et al., 2016), mostram que as melhores estratégias de roteamento veicular baseiam-se na localização dos veículos e utilizam algoritmos gulosos para adaptar-se à topologia altamente dinâmica das redes veiculares. Contudo, essas estratégias não abordam como a localização do destino é obtida, delegando essa tarefa a infraestruturas e serviços externos que seriam capazes de obter, gerenciar e transmitir aos veículos tais informações sempre que são necessárias.

Como as infraestruturas e serviços externos podem inexistir, seja por questões

financeiras, geográficas e/ou técnicas, torna-se necessário o desenvolvimento de novas soluções que permitam prever a localização corrente do destino e encaminhar as mensagens independente da disponibilidade de tais requisitos. Neste contexto, surge como possibilidade para superar esse desafio, utilizar o histórico de encontros entre os nós para armazenar e compartilhar as informações obtidas durante os contatos efetuados pelos veículos.

Portanto, de maneira análoga aos modelos matemáticos propostos pelas estratégias de roteamento DTN, que permitem estimar novos contatos entre os nós e as probabilidades de entrega de cada um deles, abordagens de previsão sobre a localização dos veículos de destino podem ser construídas tendo como base apenas informações coletadas ao longo do tempo, enquanto os veículos trafegam pelas vias e encontram outros nós. A partir dessa premissa, um modelo de previsão sobre a localização dos veículos, juntamente com uma estratégia de roteamento baseada nessa previsão, são propostos como solução para cenários onde infraestruturas e serviços externos encontram-se indisponíveis.

6 *V-SPORT*: Estratégia de Roteamento de Mensagens para Redes Veiculares Tolerantes a Atrasos

Este capítulo apresenta uma nova estratégia de roteamento de mensagens para VDTN denominada *Greedy Lightweight Spatially-Oriented Message Routing Algorithm for VDTNs – V-SPORT*. Ela propõe a utilização de um modelo de previsão operando conjuntamente com um algoritmo de encaminhamento. Essa arquitetura foi escolhida porque, devido aos altos níveis de mobilidade, algoritmos de roteamento projetados para o ambiente veicular dependem de uma boa estimativa sobre a localização dos veículos, bem como de uma eficiente estratégia de roteamento (CC et al., 2016). Todavia, é praticamente impossível prever a localização atual de um veículo, a menos que ela seja explicitamente informada. Neste contexto, novas estimativas precisam ser constantemente computadas para que a decisão sobre a retransmissão da mensagem seja tomada oportunamente, e transmissões desnecessárias sejam evitadas.

6.1 *V-SPORT*

Esta seção formaliza os conceitos e definições usados durante o desenvolvimento da estratégia de roteamento proposta nesta tese.

6.1.1 Conceitos e Definições Fundamentais

As VDTNs são redes tolerantes a atrasos e desconexão e podem ser definidas como um conjunto de sub-redes ou redes locais, conforme descrito nos capítulos 2 e 3. Logo, a estratégia de roteamento proposta vê as Redes Veiculares Tolerantes a Atrasos como um grafo $G = (N, E, r)$, onde $N = \{n_0, n_1, n_2, \dots, n_{m-1}\}$ é o conjunto de veículos ou nós; E é o conjunto de pares de nós que possuem um canal de comunicação estabelecido; e r é o raio de comunicação para cada veículo. $L(n_i) = \langle L_x(n_i), L_y(n_i) \rangle \in \mathbb{R}^2$ e $V(n_i) =$

$\langle V_x(n_i), V_y(n_i) \rangle \in R^2$ representam, respectivamente, a posição e velocidade atual do nó n_i ; $\delta(a, b) = \sqrt{(a_x - b_x)^2 + (a_y - b_y)^2}$ é a distância Euclidiana entre a e b ($a, b \in R^2$). Sendo assim, $(n_i, n_j) \in E \iff \delta(L(n_i), L(n_j)) \leq r$.

O Mapa Digital é definido como um grafo direcionado $M = (C, S)$ onde $C = \{c_0, c_1, c_2, \dots, c_{k-1}\}$ é o conjunto de vértices (cruzamento de vias) e S representa as ruas que conectam dois cruzamentos. $L(c_i) \in R^2$ é a localização fixa do cruzamento c_i . A Figura 23 ilustra essas definições.

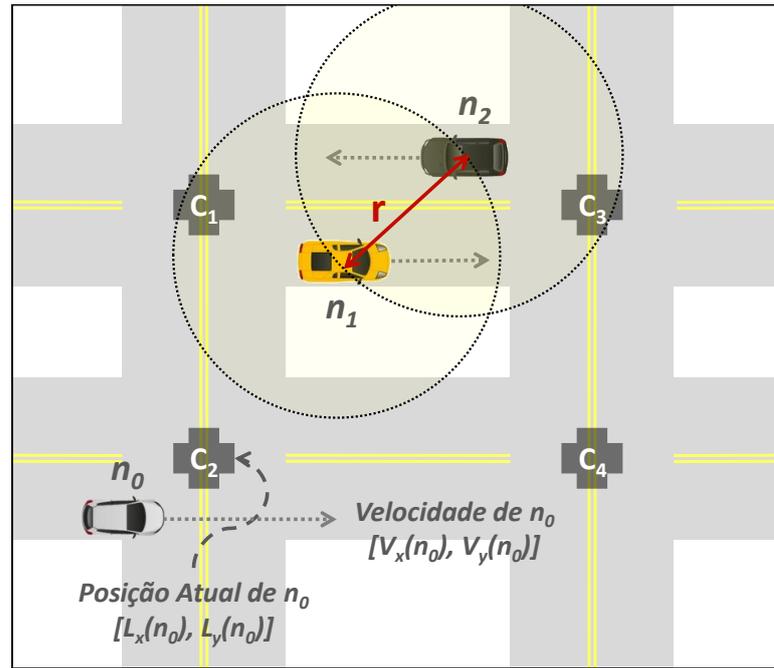


Figura 23: Definições para Rede veicular Tolerante a Atraso e Localização dos nós.

As rotas de encaminhamento $R(c_o, c_d)$ são definidas como $R(c_o, c_d) = \{L(c_o), \dots, L(c_d)\}$, onde R é o conjunto das localizações dos vértices por onde as mensagens trafegam, desde a sua origem até seu destino. A distância percorrida de uma rota é definida como $D_{R(c_o, c_d)} = \sum_{i=0}^{d-1} \delta(L(c_i), L(c_j))$, ou seja, o somatório das distâncias euclidianas entre os vértices que compõem a rota, desde o cruzamento de origem (c_o) até o cruzamento de destino (c_d).

A Figura 24 ilustra essas definições. Nela, é possível visualizar os cruzamentos ou vértices do grafo (c_0, c_1, \dots, c_8), as ruas ou arestas e suas direções de tráfego (formando um grafo direcionado), e a rota de encaminhamento $L(c_0) \rightarrow L(c_1) \rightarrow L(c_2) \rightarrow L(c_5)$ (partindo da origem $L(c_0)$ e indo até o destino $L(c_5)$).

A estratégia de roteamento proposta pelo *V-SPORT* constrói as rotas de encaminhamento das mensagens de maneira dinâmica, onde os vértices que as compõem são

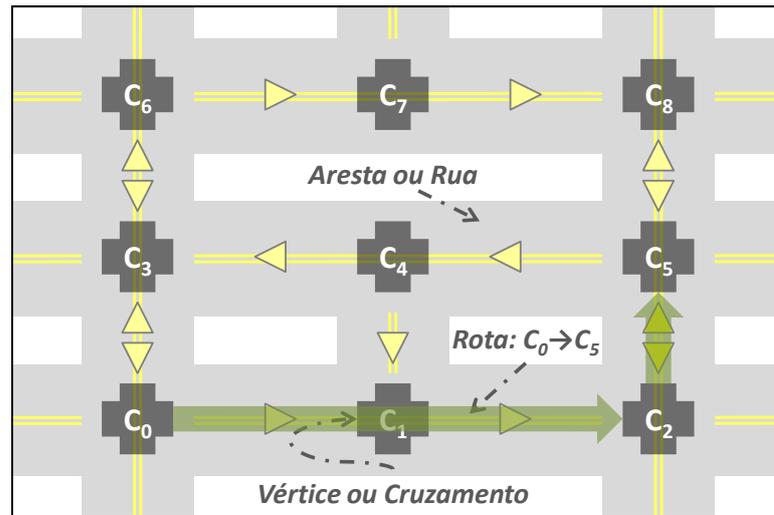


Figura 24: Exemplo para o Mapa Digital, vértices (cruzamentos) e arestas (ruas).

definidos a cada salto da mensagem, visando diminuir, gradativamente, a sua distância para o destino. Neste contexto, são escolhidos, para transportar a mensagem, os veículos que seguem na direção dos vértices definidos. O próximo vértice, que compõe a rota, só é definido quando o veículo alcança aquele que havia sido escolhido anteriormente. Essa abordagem torna possível, ao algoritmo proposto, refinar a rota de encaminhamento utilizada para entregar a mensagem.

Em outras palavras, a estratégia proposta pelo *V-SPORT* estima apenas o melhor próximo vértice que compõe a rota de encaminhamento. Essa abordagem, além de permitir que a rota seja aperfeiçoada, justifica-se porque o tempo de contato entre os veículos normalmente é curto, sendo aproveitado para as seguintes tarefas, que tendem a tomar mais tempo que a janela de contato¹: (1) encontrar todos os possíveis caminhos até o destino; (2) analisar e escolher o melhor dentre os caminhos encontrados (considerando a menor distância ou o menor tempo); (3) e transmitir a mensagem. Considerando, ainda, que os veículos armazenam e carregam dezenas de mensagens, esse procedimento precisaria ser efetuado para cada uma delas, aumentando ainda mais o tempo necessário para que o roteamento ocorra adequadamente.

6.1.2 Visão Geral dos Modelos de Mobilidade e Previsão sobre a Localização do Destino

A previsão sobre a localização dos nós em redes sem-fio móveis costuma ser uma tarefa complexa, já que esse procedimento está estritamente relacionado ao modelo de

¹a janela de contato é o intervalo de tempo em que dois nós estão dentro do raio de alcance da antena de transmissão um do outro

mobilidade dos nós que compõem o cenário do qual deseja-se efetuar a previsão. Além disso, os padrões de mobilidade utilizados durante as simulações possuem um impacto significativo sobre o desempenho dos algoritmos de roteamento no que diz respeito a métricas como taxa de entrega de mensagens e tempo médio de atraso, como visto no capítulo 4.

Portanto, ainda que a mobilidade dos veículos gere incertezas sobre a exatidão da localização do destino, à medida em que os veículos n_i , que possuem a custódia das mensagens, se aproximam do destino n_d , eles aumentam consideravelmente a probabilidade de obter informações mais recentes sobre a posição e a velocidade de n_d . Portanto, uma previsão mais precisa sobre a localização de n_d pode ser calculada.

O modelo de predição proposto pelo *V-SPORT* encontra rotas eficientes porque: (a) a última posição conhecida do destino é uma informação razoável sobre a sua localização, (b) o tempo decorrido desde o último encontro com o veículo de destino pode ser usado como uma medida de precisão, e (c) a última velocidade conhecida sobre o veículo de destino (juntamente com a localização e o tempo decorrido) pode ser usada para estimar sua posição atual, ou o próximo cruzamento para o qual destino se dirige (dependendo do método adotado).

A partir destas observações, torna-se possível estimar a posição corrente para o veículo de destino através da equação 6.1:

$$E(t) = \langle V(t) \cdot TD + P(t) \rangle \quad (6.1)$$

Através da equação 6.1, dada a informação mais recente sobre o destino, ou seja, o tempo decorrido desde a última vez que o veículo de destino foi encontrado (TD), sua última posição conhecida ($P(t)$) e sua velocidade de deslocamento ($V(t)$), os veículos podem prever a localização estimada ($E(t)$) do destino ao longo do tempo. Neste contexto, a metodologia proposta pelo *V-SPORT* permite que o tempo – que determina se uma informação sobre a localização do destino está defasada ou não – seja configurável de acordo com o ambiente veicular e a prioridade da aplicação que faz uso da sua estratégia de roteamento.

A Figura 25 apresenta, de maneira simplificada, a arquitetura proposta pelo *V-SPORT* para os modelos de previsão e encaminhamento. Nela temos, como dados de entrada para o algoritmo de previsão, o histórico de encontros entre os nós e o mapa

digital de vias². Eles são utilizados para que a previsão sobre a localização do destino seja efetuada. Essa previsão (ou cruzamento onde o destino se encontra atualmente) é o dado de saída (resultado) da execução do modelo de previsão. O modelo de encaminhamento recebe como dados de entrada a previsão efetuada e o mapa digital de vias. Ele gera como dado de saída o próximo cruzamento pelo qual a mensagem deve trafegar.

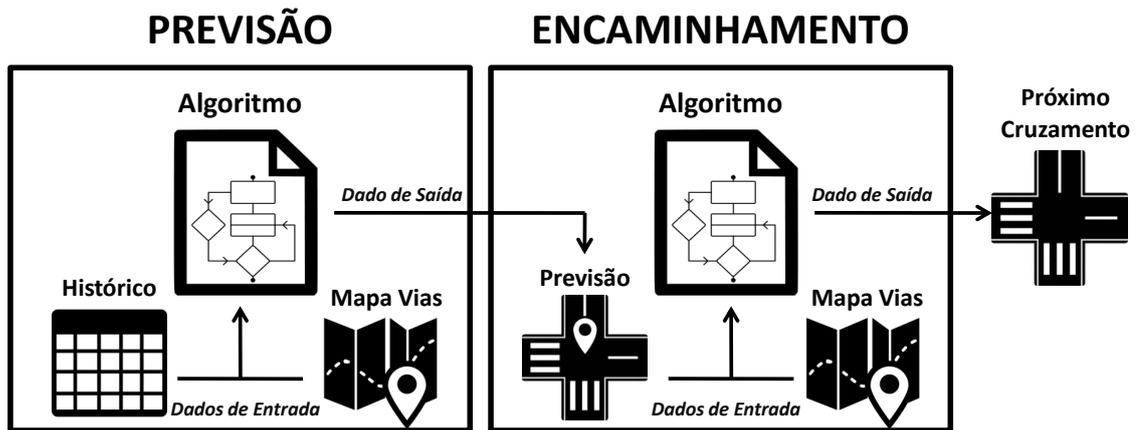


Figura 25: Arquitetura simplificada dos modelos de previsão e encaminhamento.

Analisando a Figura 25 é possível compreender a flexibilidade da arquitetura. Por exemplo, alterações no algoritmo de previsão terão impacto na arquitetura *V-SPORT* como um todo, visto que a mudança na previsão sobre a localização do destino fará com que a escolha sobre o próximo cruzamento da rota também seja modificada. Como resultado temos uma nova metodologia de roteamento, obtendo novos resultados para taxa de entrega, *overhead* e latência. Em outras palavras, novas estratégias podem ser propostas a partir da arquitetura *V-SPORT* de modo prático.

Portanto, a partir da localização preliminar calculada, o algoritmo de previsão adotado pelo *V-SPORT* propõe duas abordagens para definir o cruzamento que representa a localização atualizada do destino. A primeira abordagem baseia-se na distância euclidiana e a segunda abordagem baseia-se na distância máxima de deslocamento.

6.1.2.1 Modelo de previsão baseado na distância euclidiana

Logo após estimar a localização do veículo de destino para o tempo corrente, o modelo de previsão utiliza informações obtidas de um mapa digital para definir qual cruzamento encontra-se mais próximo da posição calculada pela equação 6.1. Para tanto,

²O *V-SPORT* considera que a atualização do mapa digital de vias é efetuada periodicamente pelo condutor do veículo, visto que ele utiliza o navegador GPS diariamente e necessita que o mesmo esteja atualizado.

o modelo faz uso da distância Euclidiana entre dois pontos e define um cruzamento como a localização atual para o destino. É a partir dessa informação que o algoritmo de encaminhamento dá continuidade ao roteamento das mensagens. Pela Figura 27 é possível visualizar que, dentre os cruzamentos (c_{10} e c_{11}) em torno da posição calculada para o veículo de destino ($L_c(n_1)$), o mais próximo é o c_{10} , ou seja, a distância euclidiana $\delta(L(c_{10}), L_c(n_1))$ é menor que a distância euclidiana $\delta(L(c_{11}), L_c(n_1))$.

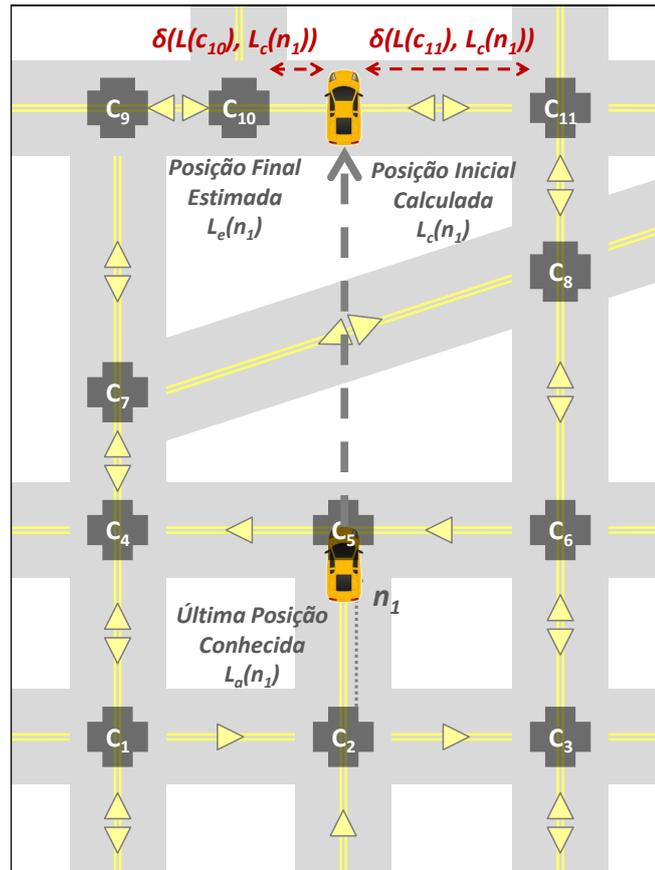


Figura 26: Modelo de previsão sobre a localização do veículo de destino baseado na distância euclidiana.

Como o modelo utilizado pelo *V-SPORT* considera que os cruzamentos de vias são os pontos de localização dos veículos, sejam eles atuais (quando os veículos se encontram num cruzamento) ou futuros (quando os veículos se dirigem para um cruzamento), ele define o cruzamento c_{10} como localização prevista para o destino. Essa abordagem é adotada porque, como visto na seção 6.1.1, para o *V-SPORT* a rota por onde uma mensagem deve ser encaminhada é sempre formada por uma sequência de cruzamentos que a leva desde sua origem até o seu destino. O objetivo da abordagem baseada na distância euclidiana é utilizar uma metodologia simples de definição sobre o cruzamento onde o veículo de destino está localizado atualmente. Essa abordagem simplista justifica-se porque os veículos carregam várias mensagens e precisam, num pequeno intervalo de tempo (durante

os contatos), obter informações sobre outros veículos, estimar a localização para cada um dos nós de destino das mensagens que carregam, definir as rotas que essas mensagens devem seguir e transmiti-las aos veículos escolhidos para dar continuidade ao roteamento.

6.1.2.2 Modelo de previsão baseado no deslocamento máximo

A segunda abordagem baseia-se no deslocamento máximo do veículo de destino. Em outras palavras, assim como no modelo anterior, a equação 6.1 é utilizada com intuito de calcular uma posição prévia para o destino ($L_c(n_1)$), considerando que ele se deslocou em linha reta. Utilizando a posição calculada e a última posição conhecida do veículo de destino ($L_o(n_1)$) é possível obter a distância máxima por ele percorrida ($d_{max} = \delta(L_o(n_1), L_c(n_1))$). Através da d_{max} são determinados quais cruzamentos encontram-se dentro da área coberta pela circunferência cujo centro é o ponto médio entre $L_o(n_1)$ e $L_c(n_1)$. Essa abordagem é adotada porque o modelo de previsão considera que os veículos, na maioria dos casos, não efetuam mudanças de direção de 180 graus. Neste contexto, são selecionados, como possíveis localizações para o destino, os cruzamentos que encontram-se a frente da sua última localização conhecida.

A Figura 27 apresenta o funcionamento do modelo de previsão baseado no deslocamento máximo. Nela é possível visualizar que os cruzamentos (c_7, c_8, c_{10}) encontram-se dentro da d_{max} calculada para o veículo de destino. Através de um mapa digital, que possibilita obter informações sobre as vias, suas direções e quais cruzamentos elas interligam, são identificadas as possíveis rotas tomadas pelo veículo de destino. Nesta etapa são consideradas apenas as rotas que possuem distância percorrida menor ou igual ao deslocamento máximo calculado ($D_{R(c_o, c_d)} \leq d_{max}$), neste caso apenas a rota $R(c_5, c_7)$ (observe que as rotas $R(c_5, c_8)$ e $R(c_5, c_{10})$ possuem distância percorrida maior que o deslocamento máximo). Após identificado o conjunto de possíveis rotas para o veículo de destino é selecionada aquela que possui distância percorrida mais próxima ao deslocamento máximo, nesse caso a rota $R(c_5, c_7)$. Sendo assim, a localização do cruzamento $L(c_7)$ é escolhida como posição estimada para o destino. A abordagem baseada no d_{max} , em contrapartida a distância euclidiana, justifica-se pelo fato dos veículos disporem de mapas digitais que permite considerar o sentido das vias e identificar rotas reais que podem ter sido tomadas pelo veículo de destino.

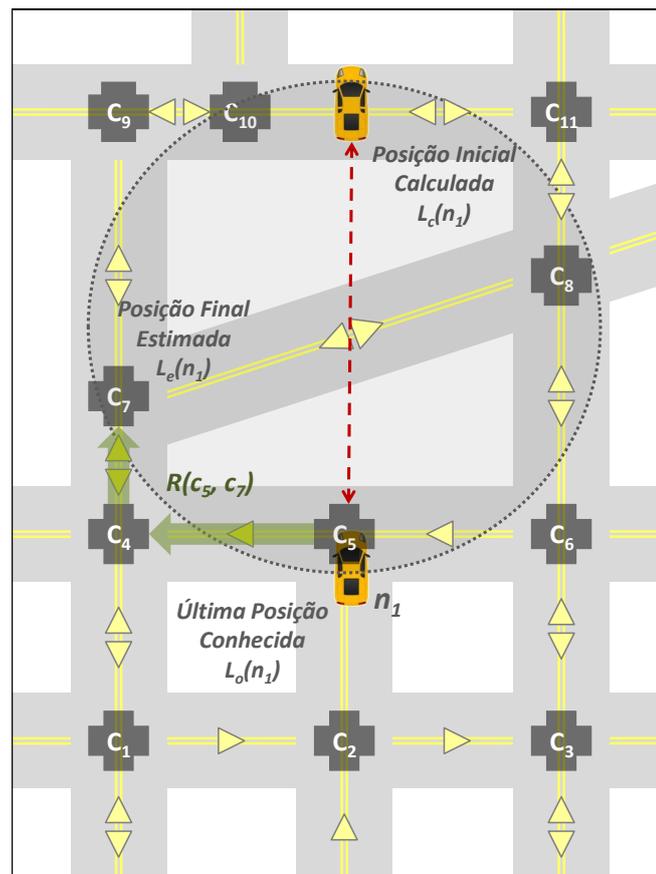


Figura 27: Modelo de previsão sobre a localização do veículo de destino baseado no deslocamento máximo.

6.1.2.3 Considerações gerais sobre os modelos de previsão

O modelo de previsão baseado na distância euclidiana possibilita que veículos equipados com unidades de bordo contendo baixo poder de processamento sejam capazes de prever a localização do destino, já que o cálculo utilizado por ele é relativamente simples. Além disso, os veículos transportam uma quantidade considerável de mensagens e precisam prever, num pequeno intervalo tempo (janela do contato), a localização de cada veículo de destino para cada uma das mensagens que estão sendo roteadas. Em outras palavras, a abordagem simplista, proposta pelo modelo de previsão baseado distância euclidiana, é capaz de: estimar a localização, estabelecer rotas de encaminhamento e transmitir as mensagens rapidamente. Em contrapartida, o modelo de previsão baseado no deslocamento máximo utiliza informações importantes que são ignoradas pelo modelo euclidiano, pois considera o sentido das vias e as possíveis rotas seguidas pelo veículo de destino. Todavia, o modelo do deslocamento máximo utiliza um algoritmo de previsão mais complexo, que exige maior poder de processamento por parte dos veículos, e um maior intervalo de tempo para prever a localização do destino e definir as rotas de

encaminhamento.

A possibilidade de alterar o método de previsão da localização do destino, que possui como base as informações advindas do histórico de encontros entre os veículos, torna o algoritmo de roteamento *V-SPORT* adaptável para que novas estratégias possam ser projetadas a partir da metodologia construída. Além disso, independente do modelo de previsão utilizado, a mobilidade dos veículos, juntamente com as informações armazenadas durante os contatos entre os nós, permitem refinar a estimativa sobre a localização do veículo de destino ao longo do tempo. Ainda que o destino tome uma direção diferente da estimada pelo algoritmo de previsão, ele sempre encontrará com outros veículos que serão capazes de fornecer informações mais atualizadas sobre ele. Através dessas informações o modelo de previsão é capaz de calcular novas estimativas, melhorar sua precisão, construir rotas em tempo real, e encaminhar mensagens até o seu destino. Portanto, a utilização do histórico de encontros entre os veículos permite estimar a localização do destino sem que a existência de um serviço de localização global, conectado a todos os nós da rede, seja presumido. Neste contexto, o modelo de previsão proposto pelo *V-SPORT* mostra-se uma alternativa viável à dependência apresentada pelos protocolos roteamento *VANET* e *VDTN* baseados em posição. Os detalhes sobre o funcionamento da estratégia de roteamento proposta pelo *V-SPORT* são apresentados a seguir.

6.1.3 A Estratégia de Roteamento *V-SPORT*

A estratégia de encaminhamento de mensagens proposta pelo *V-SPORT* utiliza uma abordagem gulosa baseada na informação sobre a localização do destino. Essa localização é fornecida pelo seu modelo de previsão, apresentado na seção 6.1.2. O funcionamento do *V-SPORT* pode ser dividido em três fases, como visto na figura 28:

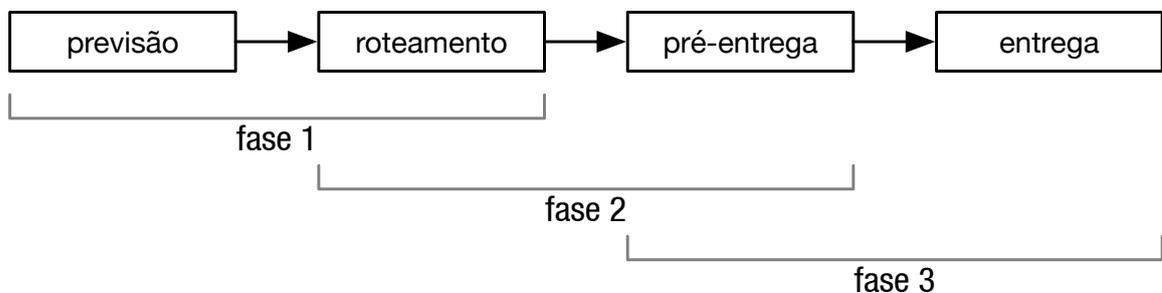


Figura 28: As fases de operação da estratégia de roteamento *V-SPORT*.

FASE 1: *Previsão* → *Roteamento* – o modelo de previsão é utilizado para estimar a localização atual do veículo de destino – esta etapa ocorre quando informações sobre o

destino estão disponíveis para o nó que possui a custódia da mensagem (denominado neste documento de veículo âncora) mas um determinado tempo já se passou desde que elas foram coletadas, ou seja, o nó de destino, muito possivelmente, já não se encontra mais naquela mesma posição;

FASE 2: *Roteamento* → *Pré-entrega* – utilizando informações mais recentes (previstas na fase 1) sobre a localização do veículo de destino, a estratégia de roteamento *V-SPORT* faz uso de um algoritmo de seleção para o próximo cruzamento que irá compor a rota de entrega da mensagem. Após essa seleção, a mensagem é encaminhada para o veículo que se desloca na direção do cruzamento escolhido;

FASE 3: *Pré-entrega* → *Entrega*: quando o nó âncora identifica que o veículo de destino encontra-se na mesma rua por onde trafega, ele seleciona e repassa a mensagem para outro veículo, levando em consideração a posição do destino – se ele está trafegando mais à frente ou mais atrás. Esse repasse visa colocar o veículo escolhido para receber a mensagem em contato com o veículo de destino.

O *V-SPORT* propõe, durante a segunda fase da sua estratégia, dois métodos de seleção para o próximo cruzamento (conforme descrito na seção 6.1.2): seleção baseada na distância euclidiana e seleção baseada na menor distância no mapa. As duas abordagens de escolha propostas pelo *V-SPORT* são apresentadas na Figura 29.

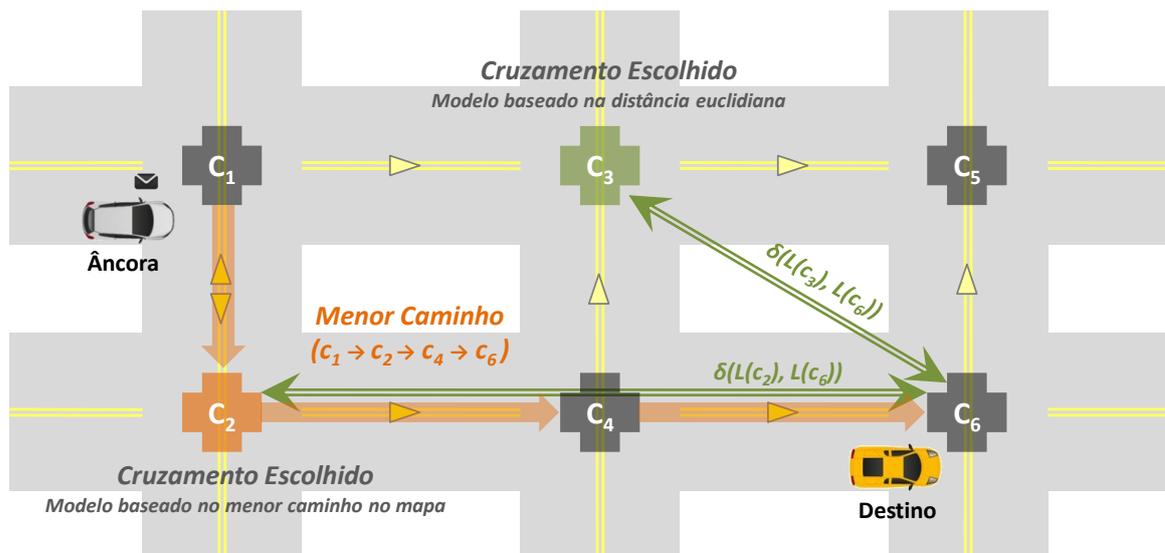


Figura 29: Métodos de seleção do próximo cruzamento: baseado na distância euclidiana e baseado na menor distância no mapa.

O método baseado na distância euclidiana, que considera apenas os cruzamentos

vizinhos e o sentido das vias que levam até eles, escolhe, como próximo vértice a compor a rota de encaminhamento, o cruzamento c_3 . Essa escolha é feita porque c_3 encontra-se mais próximo da localização estimada (c_6) para o veículo de destino, em outras palavras, ele verifica que $\delta(L(c_3), L(c_6)) < \delta(L(c_2), L(c_6))$. Em contrapartida, o método baseado na menor distância no mapa, que considera toda a rota (cruzamentos intermediários) e todos os sentidos das vias que são necessárias para alcançar o destino, escolhe como próximo vértice o cruzamento c_2 .

A Figura 30 apresenta o funcionamento da segunda fase da estratégia de roteamento *V-SPORT* no momento em que o veículo âncora está mais próximo do destino e as informações recebidas sobre ele são mais recentes. No exemplo é utilizado o método de seleção baseado na distância euclidiana, visto que, embora a metodologia de seleção possa variar, a dinâmica de funcionamento posterior à seleção mantém-se a mesma.

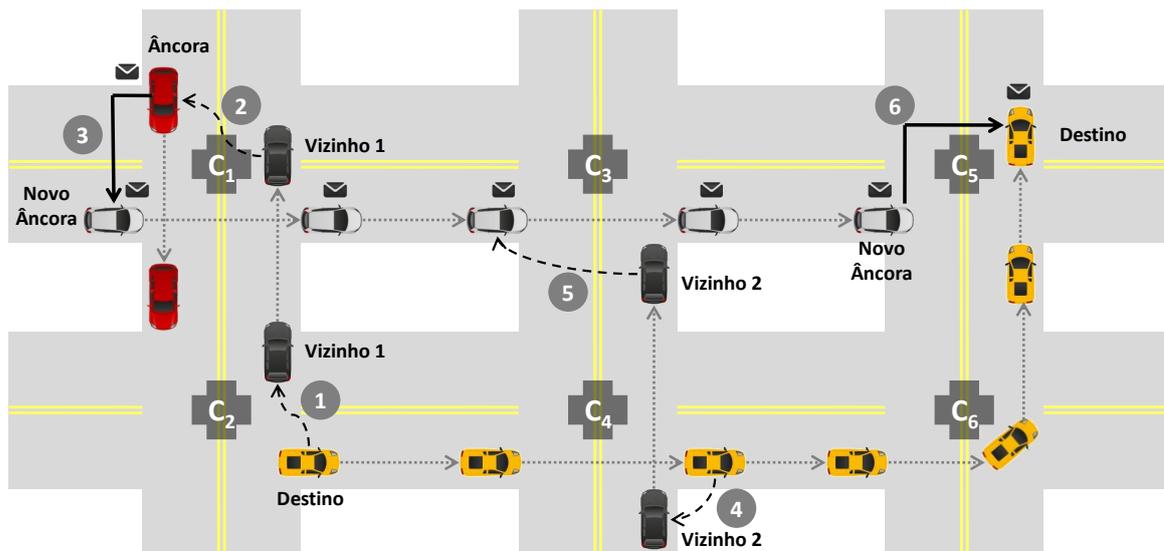


Figura 30: Exemplo do funcionamento da estratégia de encaminhamento proposta pelo *V-SPORT* em sua fase de roteamento e pré-entrega.

Para uma melhor compreensão, foram definidos seis momentos na Figura 30, numerados de acordo com a ordem cronológica que ocorrem:

1. No primeiro momento, o veículo *Vizinho 1* encontra com o veículo de *Destino*, que lhe informa para qual cruzamento (C_4) está indo e quanto tempo falta para alcançá-lo – informações obtidas do dispositivo *GPS* do veículo destino. O *Vizinho 1* ao receber essa informação consulta seu relógio interno, adiciona ao horário consultado o tempo restante para que o destino alcance o cruzamento C_4 e então armazena localmente (tabela de contatos efetuados): o tempo calculado, a posição do destino

(cruzamento que ele irá alcançar) e sua velocidade de deslocamento. Por exemplo, se o horário consultado é $09h:12m:40s$ e o veículo de destino levará $02m:03s$ para alcançar o cruzamento, então o *Vizinho 1* armazena em sua tabela o horário $09h:14m:43s$.

2. No segundo momento, o veículo *Vizinho 1* encontra o veículo *Âncora*, nesse instante ele repassa as informações sobre o *Destino* obtidas no momento anterior. Além das informações sobre o destino, o *Vizinho 1* também transmite suas informações de mobilidade, contendo o horário atualizado do seu relógio local. Esse procedimento evita a necessidade de sincronismo entre os relógios dos veículos, e também permite ao algoritmo *V-SPORT* identificar se as informações obtidas pelo *Âncora* são obsoletas ou não. É necessário, no entanto, que os relógios dos veículos avancem na mesma taxa. Por exemplo, se o horário armazenado pelo *Vizinho 1* para a posição do *Destino* foi $09h:14m:43s$, e ele faz contato com o *Âncora* as $09h:14m:21s$, repassando essas informações, este é capaz de identificar se os dados sobre o destino estão obsoletos ou não. Para isso, basta o *Âncora* o subtrair o horário do contato com o *Vizinho 1* pelo horário armazenado por ele para posição do *Destino*. No exemplo em questão, ele teria como resultado: $09h:14m:21s - 09h:14m:43s = -00h:00m:22s$, o que significa que ainda faltam 22 segundos para que o *Destino* alcance o cruzamento C_4 . Em outras palavras, a informação sobre o *Destino* é recente (não obsoleta) e o algoritmo sabe que está na segunda fase.

3. Logo após receber as informações sobre o *Destino*, o *Âncora* encontra com o veículo que será o *Novo Âncora*. O veículo encontrado é escolhido como *Novo Âncora* porque ao repassar suas informações, o *Âncora* verifica que ele se encaminha para o cruzamento C_3 e que a distância Euclidiana entre $C_3 \leftrightarrow C_4$ é menor que a distância euclidiana entre (a posição atual) $C_2 \leftrightarrow C_4$. Em outras palavras, o veículo escolhido como *Novo Âncora* está se aproximando da localização do *Destino*, e por isso uma réplica da mensagem é transmitida a ele. A opção pelo uso de replicação mensagens é discutida em detalhes na seção 7.5. Caso mais de um veículo esteja trafegando em direção ao cruzamento C_3 , o algoritmo *V-SPORT* seleciona o veículo de acordo com a prioridade da aplicação que está utilizando sua estratégia. Para isso as mensagens possuem um campo onde é possível identificar uma prioridade, ou seja, caso a prioridade da aplicação seja otimizar o tempo médio de atraso, então o veículo que se desloca mais rapidamente até o cruzamento é escolhido. Caso a prioridade seja otimizar a taxa de entrega, então o veículo com maior capacidade de armazenamento é selecionado.

4. Após encontrar o *Vizinho 1* e alcançar o cruzamento C_4 o veículo de *Destino* encontra, durante seu percurso, com outro veículo (*Vizinho 2*) para quem repassa suas informações atualizadas: para qual cruzamento (C_6) está se deslocando, quanto tempo falta até alcançar este cruzamento e qual é sua velocidade. Assim como aconteceu no primeiro momento, o veículo *Vizinho 2*, ao receber essas informações, consulta seu relógio interno, adiciona ao horário consultado o tempo restante para que o *Destino* alcance o cruzamento C_6 e armazena localmente todas as informações recebidas e processadas sobre o *Destino*.
5. No momento 5, o veículo *Vizinho 2* encontra o *Novo Âncora*, e assim como no segundo momento, repassa as informações sobre o *Destino* obtidas no momento anterior. Antes do repasse, o *Vizinho 2* consulta seu relógio interno e subtrai a hora atual da hora armazenada no momento do contato com o destino; só após isso transmite as informações ao *Novo Âncora*, que identifica que a informação sobre o *Destino* é recente e calcula a distância entre o próximo cruzamento para qual se desloca (C_5) e o cruzamento (C_6) para o qual o *Destino* estava indo, descobrindo que está se aproximando do destino.
6. O momento 6 é o instante em que o novo *Novo Âncora* encontra com o veículo de *Destino* no cruzamento C_5 , o que lhe possibilita efetuar a entrega da mensagem que foi recebida durante o encontro com o *Âncora* no cruzamento C_1 .

As informações obtidas, sobre outros veículos durante os contatos, são armazenadas localmente na Tabela de Informações do Contato ou TIC. A *TIC* é composta por cinco campos: *ID*, *hora*, *posição*, *velocidade* e *tempo*, como pode ser visto na tabela 4. O campo *ID* armazena a identificação do veículo encontrado; o campo *hora* contém o horário (relógio local) em que o veículo encontrado alcançará o cruzamento para o qual se desloca; o campo *posição* contém a localização geográfica para o cruzamento em questão; o campo *velocidade* armazena a velocidade média do veículo no momento do encontro; e o campo *tempo* contém o tempo necessário para que o veículo alcance o próximo cruzamento para o qual se desloca.

Tabela 4: Tabela de informações do contato.

ID	Hora	Posição	Velocidade	Tempo
1	<i>hh : mm : ss</i>	<i>Lat, Lon</i>	V_x, V_y	<i>hh : mm : ss</i>
2	<i>hh : mm : ss</i>	<i>Lat, Lon</i>	V_x, V_y	<i>hh : mm : ss</i>
3	<i>hh : mm : ss</i>	<i>Lat, Lon</i>	V_x, V_y	<i>hh : mm : ss</i>

Tabela 5: Tabela de informações do contato – (a) veículo 1, (b) veículo 5.

ID	Hora	Tempo	ID	Hora	Tempo
1	09 : 12 : 00	00 : 01 : 10	5	16 : 45 : 00	00 : 02 : 15
2	09 : 13 : 10	00 : 02 : 40	6	16 : 39 : 45	00 : 05 : 35
3	08 : 59 : 00	00 : 04 : 30	7	16 : 48 : 25	00 : 06 : 15

(a)

(b)

A primeira linha da tabela é utilizada pelos veículos para armazenarem suas próprias informações. Quando dois veículos efetuam um contato eles inserem suas informações atualizadas na primeira linha da tabela e, então, trocam suas respectivas *TICs*. As informações armazenadas nessa linha permitem aos veículos, quando recebem as *TICs*, identificar para qual cruzamento se deslocam os vizinhos encontrados e quanto tempo eles levam para alcançá-lo. Através dessa informação é possível verificar o quão próximo (distância euclidiana) o veículo encontrado estará do destino e quanto tempo ele levará para alcançar essa localização.

Como o campo *hora* da primeira linha da *TIC* contém o horário atual do veículo que enviou a tabela de informações, ele pode ser utilizado para calcular o quão defasadas estão as informações armazenadas sobre os veículos contactados anteriormente. Por exemplo, supondo o contato entre os veículos 1 e 5 que possuem como *TIC* as informações apresentadas na tabela 5. Foram consideradas nas tabelas, do exemplo, apenas as informações sobre *hora* e *tempo*, visto que o objetivo é mostrar como os veículos, que recebem essas informações, procedem para interpretá-las adequadamente.

Considerando o veículo 1, ao receber a *TIC* do veículo 5, ele sabe que seu o horário (relógio interno) marca $16:45:00$, visto que a primeira linha da tabela recebida contém as informações do veículo que compartilha sua *TIC*. Através do campo *hora*, ele é capaz de calcular o tempo decorrido desde que o veículo 5 esteve em contato com os veículos 6 e 7, determinando se as informações obtidas estão defasadas ou não. Para efetuar esse procedimento o veículo 1 subtrai o conteúdo do campo *hora*, que está na primeira linha da tabela, do conteúdo do campo *hora* das linhas (dois e três) que contém as informações dos veículos 6 e 7.

A partir da subtração, o veículo 1 obtém como resultado os seguintes valores: (veículo 6) $16:45:00 - 16:39:45 = 00:05:15$; (veículo 7) $16:45:00 - 16:48:25 = -00:03:25$. Pelos dados obtidos o veículo 1 é capaz de determinar se a informação de localização recebida para cada um dos veículos está defasada ou não. No exemplo, ele constata que a localização recebida para o veículo 6 está defasada em pouco mais de cinco minutos, já

a localização para o veículo 7 está defasada em pouco mais de três minutos.

Considerando que o veículo 1 possui uma mensagem endereçada ao veículo 6, ele efetuará os seguintes procedimentos, de acordo com o modelo de roteamento proposto pelo *V-SPORT*: (1) executar a primeira fase do algoritmo, *Previsão* → *Roteamento*, com intuito de estimar a localização do veículo 6 para o momento corrente, visto que a informação recebida está defasada; (2) com a estimativa calculada, executar a segunda fase do algoritmo, *Roteamento* → *Pré-entrega*, com o objetivo de identificar qual dos vizinhos se desloca na direção do cruzamento mais próximo da localização estimada para o destino (veículo 6). No caso do veículo 1 estar de posse de uma mensagem endereçada ao veículo 7, apenas a segunda fase do algoritmo seria necessária, visto que a informação recebida sobre sua localização está atualizada.

Tabela 6: Tabela de informações do contato para o veículo 1 – após encontrar o veículo 5.

ID	Hora	Posição	Velocidade	Tempo
1	09 : 12 : 00	Lat, Lon	V_x, V_y	00 : 01 : 10
2	09 : 13 : 10	Lat, Lon	V_x, V_y	00 : 02 : 40
3	08 : 59 : 00	Lat, Lon	V_x, V_y	00 : 04 : 30
5	09 : 14 : 15	Lat, Lon	V_x, V_y	-00 : 02 : 15
6	09 : 06 : 45	Lat, Lon	V_x, V_y	00 : 05 : 15
7	09 : 15 : 25	Lat, Lon	V_x, V_y	-00 : 03 : 25

Por fim, considerando, ainda, o exemplo onde o veículo 1 recebe a *TIC* do veículo 5, ele atualiza, localmente, sua tabela de informações do contato com os dados recebidos durante o encontro. Utilizando a primeira linha da *TIC* do veículo 5 e as subtrações calculadas para os veículos 6 e 7, o veículo 1 insere (ou atualiza) novas entradas na sua tabela de informações de contato, tendo como base seu relógio interno para preencher o campo *hora*. O resultado desse procedimento pode ser visto na tabela 6. A metodologia adotada permite, ao veículo 1, calcular, sempre que necessário, o tempo decorrido desde a última informação conhecida sobre a localização dos veículos, determinando se elas estão desatualizadas ou não – isso pode ser feito pela subtração da hora corrente do seu relógio interno, pelo valor preenchido para o campo *hora* de cada um dos registros.

A partir das informações obtidas durante os contatos, do modelo de previsão proposto pelo *V-SPORT* (detalhado na seção 6.1.2) e da dinâmica apresentada na Figura 30, é possível compreender o funcionamento da estratégia de roteamento: onde o caminho pelo qual a mensagem será encaminhada é definido de maneira dinâmica, conforme informações mais atualizadas sobre o destino são recebidas e veículos trafegando

em sua direção são encontrados. Esse método de construção de rotas evita que altos valores de *overhead* sejam produzidos, como acontece com os protocolos de roteamento que pré-estabelecem e agregam as mensagens todo o caminho (conjunto de cruzamentos) pelo qual elas devem trafegar.

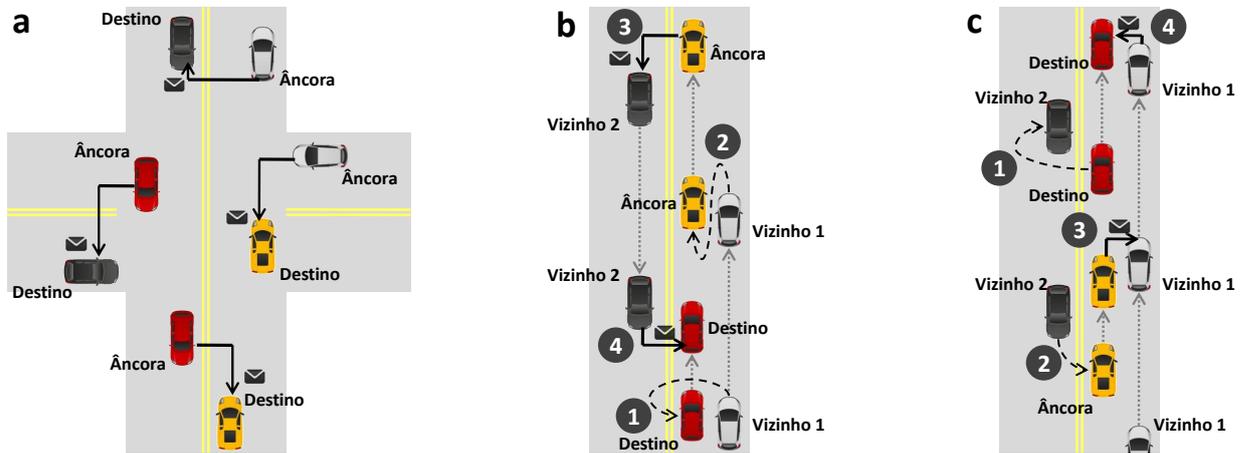


Figura 31: Modos de entrega de mensagem previstos pelo *V-SPORT* – (a) *Âncora* e *Destino* encontram-se diretamente; (b) *Âncora* encontra-se na mesma rua, no mesmo sentido e à frente do *Destino*; (c) *Âncora* encontra-se na mesma rua, no mesmo sentido e atrás de *Destino*.

Além do modo de entrega visto na Figura 30, a estratégia *V-SPORT* prevê, em sua terceira fase, outras duas abordagens que são apresentadas na Figura 31. O modo visto na Figura 31(a) acontece quando o veículo *Âncora* encontra com o veículo de *Destino* de forma direta, ou seja, ele faz contato com o *Destino* num cruzamento ou no momento em que os dois trafegam pela mesma rua mas em sentidos opostos – esse é o modo mais simples e o mesmo mostrado na Figura 30. Entretanto, também existe a possibilidade dos veículos *Âncora* e *Destino* acabarem trafegando pela mesma rua e no mesmo sentido. Esse acontecimento (Figura 31(b) e (c)) pode atrasar ou até mesmo inviabilizar a entrega da mensagem ao seu destino, levando a estratégia *V-SPORT* à sua terceira fase, onde é capaz de identificar essa ocorrência e tomar os procedimentos necessários para que a entrega aconteça.

Neste contexto, o modo abordado na Figura 31(b) apresenta o funcionamento da fase de entrega, quando o *Âncora* encontra-se: na mesma rua, no mesmo sentido e à frente do *Destino*. No instante “1” o veículo *Vizinho 1* faz contato com o *Destino* e obtém informações sobre sua velocidade, qual cruzamento ele irá alcançar e em quanto tempo. No momento “2”, mais a frente e na mesma rua, o *Vizinho 1* repassa as informações obtidas sobre o *Destino* ao *Âncora*. Ao analisá-las, o *Âncora* verifica que tanto ele quanto o *Destino* seguem para o mesmo cruzamento, e que o tempo necessário para o *Destino*

alcançar esse cruzamento e sua velocidade são maiores. Em outras palavras, o *Âncora* sabe que está na mesma rua do *Destino* porém à frente dele. Ciente desta informação, o veículo *Âncora* repassa uma cópia da mensagem com baixo *TTL* (instante “3”) para *Vizinho 2* (que se desloca no sentido oposto), para que no instante “4” a mensagem seja entregue. O *TTL* é definido através do cálculo do tempo necessário para que o *Vizinho 2* alcance o *Destino*, tendo como base suas velocidades de deslocamento.

O modo de entrega abordado na Figura 31(c) é semelhante ao descrito anteriormente. Porém, apesar do *Âncora* e do *Destino* trafegarem pela mesma rua e mesmo sentido, dessa vez o veículo *Âncora* está atrás do veículo de *Destino*. No instante “1” o veículo *Vizinho 2* faz contato com o *Destino* e obtém informações sobre sua velocidade, qual cruzamento ele irá alcançar e em quanto tempo. No momento “2”, mais à frente e na mesma rua, o *Vizinho 2* repassa as informações obtidas sobre o *Destino*. Ao analisar tais informações, o *Âncora* verifica que tanto ele quanto o *Destino* seguem para o mesmo cruzamento, e que o tempo necessário para o *Destino* alcançar esse cruzamento e sua velocidade são menores. Em outras palavras, o *Âncora* sabe que está na mesma rua do *Destino* porém atrás dele. Ciente disto, o veículo *Âncora* repassa uma cópia da mensagem com baixo *TTL* (instante “3”) para *Vizinho1*. A escolha pelo *Vizinho1* se deve ao fato dele estar se deslocando mais rapidamente que o destino, podendo alcançá-lo no instante “4” e assim efetuar a entrega. O *TTL* é definido através do cálculo do tempo necessário para que o *Vizinho 2* alcance o *Destino*, tendo como base suas velocidades de deslocamento.

Para as outras duas possibilidades de combinação entre velocidade e tempo o veículo *Âncora* repassa duas cópias da mensagem com baixo *TTL*: uma para um veículo que se desloca no sentido oposto ao dele e outra para um veículo que se desloca no mesmo sentido mas com velocidade maior que a do destino.

6.1.4 Modelo Formal de Funcionamento

Com o objetivo de descrever formalmente o modelo *V-SPORT*, especificando de modo simplificado cada um de seus módulos e fases de operação, são apresentados e descritos a seguir: (a) o diagrama de estados para cada fase de operação (Figura 32), (b) o algoritmo principal da estratégia (Algoritmo 1), (c) o algoritmo do modelo de previsão (Algoritmo 2), (d) o algoritmo do modelo de encaminhamento (Algoritmo 3) e (e) o algoritmo do procedimento de pré-entrega e entrega (Algoritmo 4).

O primeiro estado (ou fase) de funcionamento descreve a etapa de previsão so-

bre a localização do destino. Nesse período, o modelo de roteamento *V-SPORT* aguarda informações sobre o destino que são obtidas durante os contatos efetuados com outros veículos. É possível notar que todos os estados do diagrama possuem (lado direito superior) um símbolo indicando que os contatos e as atualizações do histórico de encontros são constantes e ocorrem em paralelo a cada uma das fases. Sendo assim, quando informações sobre o veículo de destino encontram-se disponíveis e não estão defasadas, a última localização conhecida sobre ele é diretamente repassada para etapa de encaminhamento, caso contrário, uma previsão sobre a localização é efetuada e repassada. Neste momento, a estratégia *V-SPORT* entra na sua fase de encaminhamento, responsável por rotar a mensagem até seu destino.

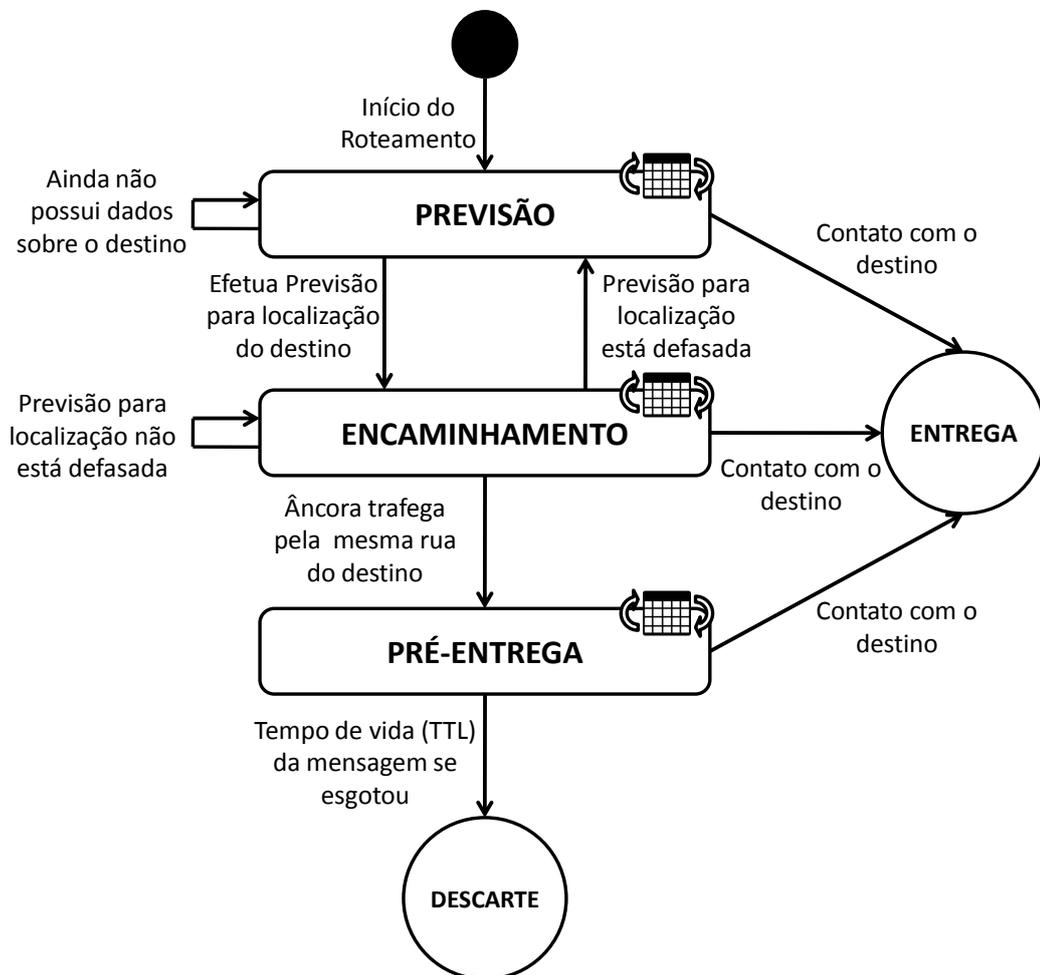


Figura 32: Diagrama de estados para o funcionamento do *V-SPORT*.

Na etapa de encaminhamento, o *V-SPORT* define qual será o próximo cruzamento pelo qual a mensagem deve trafegar. Durante essa ação a estratégia possui três possibilidades de procedimento: (1) continuar definindo os próximos cruzamentos da rota, sempre que o último cruzamento escolhido é alcançado – esse fluxo é adotado enquanto a

informação sobre o destino está atualizada; (2) voltar à primeira fase e calcular uma nova previsão sobre a localização do destino, para posteriormente definir qual será o próximo cruzamento que compõem a rota de entrega – esse fluxo é adotado quando a informação sobre o destino está defasada; (3) ir para ação de pré-entrega da mensagem – esse fluxo é adotado quando um novo contato repassa informações atualizadas sobre o destino e o algoritmo identifica que o veículo âncora e o veículo de destino encontram-se na mesma rua.

No momento em que fluxo de execução é deslocado para ação de pré-entrega a estratégia *V-SPORT* analisa os últimos dados atualizados sobre o veículo de destino com intuito de identificar se ele está localizado mais frente ou mais atrás na mesma via. Logo após essa identificação, um dos vizinhos é escolhido para efetuar a entrega da mensagem, e para ele é repassada uma réplica contendo um tempo de vida curto. Neste instante, dois fluxos de execução são possíveis: (1) o veículo que recebeu a cópia efetua a entrega ao destino e (2) o tempo de vida da mensagem se esgota.

Para possibilitar uma descrição mais detalhada sobre a metodologia de funcionamento do *V-SPORT* são apresentados quatro algoritmos.

Algoritmo 1 Estratégia *V-SPORT* (principal)

início

$TTL \leftarrow valor;$

$entrega \leftarrow false;$

$procedimento \leftarrow 1;$

repita

$dadosContato \leftarrow efetuaNovoContato();$

$historico \leftarrow atualizaHistorico(dadosContato);$

se $procedimento = 1$ **então**

 | Previsão sobre a Localização do Destino

senão se $procedimento = 2$ **então**

 | Encaminhamento da Mensagem

senão se $procedimento = 3$ **então**

 | Pré-entrega e Entrega da Mensagem

$TLL \leftarrow TLL - 1;$

até $entrega = true$ **ou** $TLL = 0;$

fim

O Algoritmo 1 descreve o modo principal de operação da estratégia, que integra os procedimentos de previsão, encaminhamento e pré-entrega (descritos separadamente nos Algoritmos 2, 3 e 4). Nele é possível compreender o ciclo de vida de roteamento das mensagens, que se inicia quando uma mensagem é gerada, sendo definidos seu tempo de

vida, o status da entrega (se já alcançou a etapa de pré-entrega ou não) e o procedimento inicial (fase de previsão) de operação da estratégia. O roteamento é executado até que a mensagem seja entregue ao seu destino ou até que seu tempo de vida se esgote. Durante todo o ciclo de vida de operação novos contatos são efetuados, e novas atualizações no histórico de encontros são produzidas, influenciando o fluxo de execução (procedimento atual) do algoritmo.

Algoritmo 2 Previsão sobre a Localização do Destino (Procedimento 1)

```

início
  Entrada: historico ← getHistorico();
  Entrada: mapaDigital = getMapaDitalVias();
  Entrada: idDestino ← getIdDestinoMsg();
  se historico.getDadoHistorico(idDestino) <> NULL então
    dadosD = historico.getDadoHistorico(idDestino);
    se dadosD.isDefasado() então
      | previsao ← algoritmoPrevisao(dadosD, mapaDigital);
    senão
      | previsao ← dadosD.getLocalizacao();
    fim
    procedimento ← 2;
  fim
fim

```

O procedimento de previsão (Algoritmo 2) utiliza como informações de entrada o histórico de encontros, um mapa digital de vias e o identificador do destino – agregado a mensagem no momento em que ela é gerada. Juntamente com esses dados, contatos com outros veículos são efetuados até que informações sobre o destino sejam obtidas. Através dessas informações o *âncora* é capaz de identificar se a localização do destino recebida está defasada ou não. Caso ela esteja, o modelo de previsão é executado e uma nova localização é prevista. Caso contrário, a localização obtida do histórico de encontros é utilizada pelo modelo de encaminhamento. Após essa etapa, a entrada *procedimento* é configurada com valor 2, indicando que o fluxo de execução da estratégia foi direcionado para a ação de encaminhamento.

O procedimento de encaminhamento (Algoritmo 3) contém a lógica executada após a localização do destino estar disponível. Ele utiliza como entrada a previsão efetuada na etapa anterior, um mapa digital de vias, o identificador e as informações mais recentes disponíveis sobre o veículo de destino. A primeira ação tomada é identificar, a partir da localização do destino, o próximo cruzamento pelo qual a mensagem deve trafegar. Terminada essa ação, o algoritmo verifica se o destino também desloca-se na mesma

direção do âncora e para o mesmo cruzamento, ou seja, ele encontra-se na mesma rua. Se a verificação for verdadeira, o fluxo de execução é deslocado para etapa de pré-entrega – a entrada *procedimento* é configurada com valor 3. Caso contrário, um dos veículos vizinhos, que segue na direção do próximo cruzamento, é selecionado para receber uma cópia da mensagem. Após a transmissão da réplica, tanto o veículo vizinho quanto o veículo âncora suspendem, por alguns instantes, o processo de roteamento até que o cruzamento seguinte de suas trajetórias seja atingido. Quando esse intervalo termina eles retomam o processo de roteamento e verificam se os dados sobre o destino estão defasados novamente. Caso estejam o fluxo de código é deslocado para a ação de previsão – a entrada *procedimento* é configurada com valor 1. Caso contrário, o fluxo de código se mantém na etapa de encaminhamento e todos os procedimentos anteriores são executadas novamente.

Algoritmo 3 Encaminhamento da Mensagem (Procedimento 2)

```

início
  Entrada: previsao ← getPrevisao();
  Entrada: mapaDigital ← getMapaDigitalVias();
  Entrada: idDestino ← getIdDestinoMsg();
  Entrada: dadosD ← getDadoHistorico(idDestino);
  proxCruz ← algoritmoEncaminhamento();
  se dadosD.getProxCruz() = proxCruz então
    | procedimento ← 3;
  senão
    | idVizinho ← getIdVizinhoSegueProxCruz();
    | encaminharCopiaMensagem(idVizinho);
    | enquanto atualCruz <> proxCruz faça
    | | Aguardar();
    | fim
    | se dadosD.isDefasado() então
    | | procedimento ← 1;
    | fim
  fim
fim

```

O Algoritmo 4 apresenta a lógica executada durante o procedimento de entrega. Ele utiliza como entrada o identificador dos contatos que estão sendo efetuados, os dados locais do veículo âncora, o identificador e as informações mais recentes disponíveis sobre o veículo de destino. A primeira ação executada é verificar, dentre os veículos que estão sendo contatados, se um deles é o destino da mensagem. Caso seja, a mensagem é entregue e o roteamento atingiu seu fim. Caso contrário, dados sobre a velocidade e o tempo até o próximo cruzamento são obtidos e calculados para os veículos âncora e destino.

De posse dessas informações o *V-SPORT* é capaz de identificar onde localiza-se o destino quando na mesma rua do âncora. Para tal, ele compara os tempos até o próximo cruzamento e as velocidades dos dois veículos. Se o tempo e a velocidade do destino são maiores que os apresentados pelo âncora, então ele encontra-se mais atrás, e o vizinho que se desloca no sentido contrário e com menor velocidade é escolhido para receber uma cópia da mensagem (com *TTL* curto). Se o tempo e a velocidade do destino são menores que os apresentados pelo âncora, então ele encontra-se mais a frente, e o vizinho que se desloca no mesmo sentido e com maior velocidade é escolhido para receber uma cópia da mensagem (com *TTL* curto).

Algoritmo 4 Pré-entrega e Entrega da Mensagem (Procedimento 3)

início
Entrada: $idNovoContato \leftarrow getIdContatoAtual();$
Entrada: $dadosA \leftarrow getDadoLocalAncora();$
Entrada: $idDestino \leftarrow getIdDestinoMsg();$
Entrada: $dadosD \leftarrow getDadoHistorico(idDestino);$
se $idNovoContato = idDestino$ **então**

 | $entregarMensagem();$
senão

 | $tempoA \leftarrow dadosA.getTempoProxCruz();$

 | $velocA \leftarrow dadosA.getVelocidade();$

 | $tempoD \leftarrow dadosD.getTempoProxCruz();$

 | $velocD \leftarrow dadosD.getVelocidade();$
se $tempoD > tempoA$ e $velocD > velocA$ **então**

 | $idVizinho \leftarrow getIdVizinhoSentidoContrario();$

 | $encaminharCopiaMensagemBaixoTLL(idVizinho);$
senão se $tempoD < tempoA$ e $velocD < velocA$ **então**

 | $idVizinho \leftarrow getIdVizinhoMesmoSentido();$

 | $encaminharCopiaMensagemBaixoTLL(idVizinho);$
senão

 | $idVizinho \leftarrow getIdVizinhoSentidoContrario();$

 | $encaminharCopiaMensagemBaixoTLL(idVizinho);$

 | $idVizinho \leftarrow getIdVizinhoMesmoSentido();$

 | $encaminharCopiaMensagemBaixoTLL(idVizinho);$
fim
fim
 $entrega \leftarrow true;$
fim

Para as outras duas combinações de velocidade e tempo não é possível definir com exatidão a localização (atrás ou a frente) do destino, e por isso duas mensagens são replicadas através da adoção do dois procedimentos descritos anteriormente. Após

transmitir a cópia com *TTL* curto, o veículo âncora considera que a mensagem atingiu sua fase de entrega (término do roteamento), e por isso a cópia que ficou com ele é descartada (a entrada *entrega* é configurada com o valor *true*). Em contrapartida, o veículo que recebeu a réplica com *TTL* curto carrega a mensagem consigo até que um contato com o veículo de destino seja efetuado ou seu tempo de vida se esgote.

6.1.5 Considerações Finais

A arquitetura proposta pela estratégia de roteamento *V-SPORT*, que engloba os modelos de previsão sobre a localização do destino e encaminhamento de mensagens, visa garantir que a comunicação de dados e a troca de mensagens entre os veículos possam ocorrer ainda que eles trafeguem por ambientes veiculares onde infraestruturas e serviços externos de localização não estejam disponíveis. Para tal, foram projetados dois modelos de previsão simplificados (euclidiano e deslocamento máximo) capazes de estimar localmente a posição do destino (veículo âncora), utilizando apenas informações coletadas e compartilhadas durante os contatos entre os nós.

A adoção de uma abordagem simplificada justifica-se porque para VDTN com arquitetura de comunicação V2V as principais estratégias de roteamento propostas na literatura e que baseiam-se na localização do destino, não se aplicam. Elas são incapazes de operar adequadamente nesses cenários porque dependem de premissas (infraestruturas e serviços de localização) que não encontram-se disponíveis. Adicionalmente a essa restrição, serviços externos de localização, que apresentam técnicas mais robustas de previsão, como Cadeias de Markov (HASBOLLAH; ARIFFIN; FISAL, 2016) e Filtros de Kalman (FENG et al., 2015), também assumem que todos os veículos estão conectados o tempo todo a infraestruturas que permitem coletar constantemente dados sobre a mobilidade de todos os veículos da rede. Apenas a partir desses dados é que tais serviços são capazes de prever remotamente a localização de qualquer veículo. Entretanto, essa dinâmica de operação não funciona adequadamente em ambientes veiculares reais, que estão expostos a frequentes desconexões entre os veículos e as infraestruturas (devido a mobilidade dos nós) e a cenários onde as infraestruturas nem mesmo estão disponíveis.

No capítulo 7 são apresentados: o método utilizado para validação da proposta, o ambiente e os parâmetros de simulação usados e os resultados obtidos pela estratégia *V-SPORT*.

7 Validação da Proposta

Para comprovar que os principais objetivos propostos pela estratégia *V-SPORT* foram contemplados, ou seja, que o modelo de previsão e encaminhamento projetados são capazes de rotear mensagens em redes veiculares parcialmente conectadas que não possuem suporte de infraestruturas e serviços de localização externos, foi efetuado um conjunto abrangente de experimentos contendo diferentes cenários. A escolha pelo uso da simulação está atrelada ao fato dela ser uma ferramenta computacional abrangente capaz de adquirir conhecimento sobre uma determinada área, permitindo analisar o comportamento das soluções que são propostas para diferentes linhas de pesquisa (GAVIRA, 2003). Além disso, a simulação é o método mais utilizado por pesquisadores que estudam o desenvolvimento de novas metodologias de roteamento de mensagens para redes veiculares, caso da pesquisa apresentadas nesta tese de doutorado.

Tendo como intuito, ainda, avaliar de maneira ampla o comportamento da estratégia *V-SPORT*, compreendendo sua utilidade dentro das inúmeras aplicações (segurança, informação e entretenimento) voltadas ao ambiente veicular, optou-se por selecionar cinco fatores de impacto, onde o valor dos parâmetros de simulação variaram ao longo dos experimentos. Tal metodologia permitiu criar diversos cenários e a avaliar a estratégia dentro de diferentes contextos de operação, o que eliminou a possibilidade do *V-SPORT* apresentar resultados satisfatórios apenas para um ambiente específico, contendo uma configuração totalmente estática. Essa abordagem de validação contempla também, outro objetivo do *V-SPORT*, que é ser capaz de alcançar desempenho estável quando exposto a cenários mutáveis.

7.1 Ambiente e Parâmetros de Simulação

As redes veiculares possuem um conjunto heterogêneo de arquiteturas (Figura 33) que contemplam os muitos cenários aos quais seus nós podem ser submetidos. Na arquitetura veicular infraestruturada pura (Figura 33a), também conhecida como arqui-

tetura veiculo-a-infraestrutura (V2I), a rede pode fazer uso, como suporte a comunicação, de infraestruturas como: unidades de acostamento (normalmente localizados em cruzamentos de vias), redes celulares e redes sem fio. Essas infraestruturas permitem obter informações sobre o tráfego de veículos (congestionamento), sobre possíveis rotas para os nós, além de possibilitar o acesso à Internet. Na arquitetura veicular pura, (Figura 33b) ou arquitetura veiculo-a-veiculo (V2V), os nós não fazem uso de infraestruturas externas para auxiliar a comunicação e transmissão de informações sobre rotas e veículos remotos. Nesta arquitetura a comunicação e troca de informações ocorre exclusivamente entre os veículos que são equipados com sensores e dispositivos eletrônicos como GPS, mapa digital e unidade de bordo. Na arquitetura híbrida (V2I e V2V), Figura 33c, ambas as abordagens estão presentes.

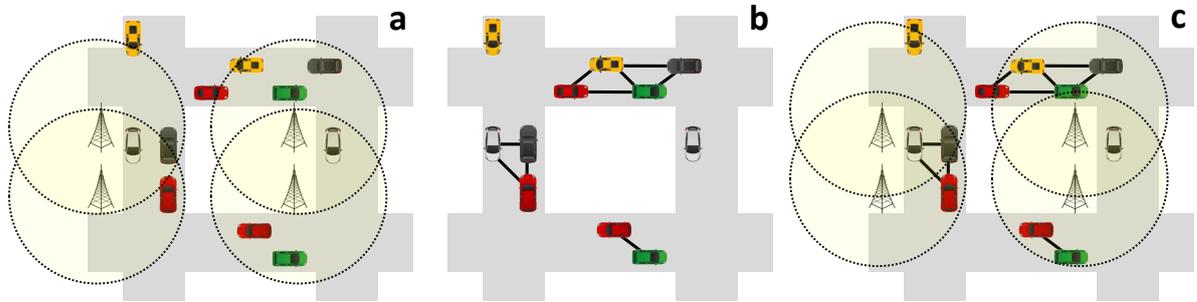


Figura 33: Arquitetura de Rede VDTN: (a) Infraestruturada pura (V2I), (b) Veicular pura (V2V), (c) Híbrida (V2I e V2V).

Fonte: (SHAREF; ALSAQOUR; ISMAIL, 2014) – Adaptado.

Como apresentado no capítulo 6, a estratégia proposta pelo *V-SPORT* baseia-se no modelo de previsão sobre localização do veículo de destino, através da utilização do histórico de encontros entre os nós. O objetivo do modelo de previsão proposto pelo *V-SPORT* é fazer com que sua estratégia de encaminhamento não seja totalmente dependente da existência de um serviço de localização global que obtém, gerencia e fornece aos veículos da rede a localização de qualquer nó a qualquer momento. Neste contexto, o cenário de simulação escolhido, para avaliar o desempenho do *V-SPORT*, faz uso de uma arquitetura veicular pura (V2V).

Para definir a topologia e o ambiente de simulação foram analisados os cenários utilizados pelas estratégias de roteamento VDTN (seção 5.2.3) usadas como referência durante o desenvolvimento do *V-SPORT*. As informações coletadas sobre as topologias e ambientes de simulação são apresentadas na tabela 7.

As topologias utilizadas nos cenários de simulação propostos pelo protocolos VDTN trabalham, em sua maioria, com mapas de cidades e um número de veículos

Tabela 7: Topologia e ambiente de simulação utilizado pelas estratégias de roteamento VDTN.

Estratégia	Topologia	Ambiente de Simulação
GeOpps	260 veículos; área de 15km x 15km.	OMNet++
DARCC	100 veículos; área de 3km x 3km; velocidade média de 60km/h.	Opportunistic Network Environment Simulator (The ONE).
DAWN	5000 taxis; cidade de Beijing na China; 30 dias.	Simulação com dados do ambiente real.
GeoSpray	100 nós móveis; velocidade média de 50km/h; mapa da cidade de Helsinki; 6 horas	VDTNSim – baseado no simulador The ONE.

ou nós móveis variando entre 100 e 260. No que diz respeito ao ambiente de simulação utilizado, duas das quatro abordagens fazem uso do Ambiente de Simulação para Redes Oportunista – *The ONE* (KERÄNEN; OTT; KÄRKKÄINEN, 2009). A partir desses dados, optou-se por utilizar como topologia, assim como proposto pela estratégia de roteamento *GeoSpray*, o mapa da cidade de Helsinki, cenário padrão do simulador *The ONE* (Figura 34), com um número inicial de 100 veículos (rede esparsa – VDTN), trafegando com velocidade média de 50 km/h (ambiente urbano), em uma área de 4.5km x 3.4km, durante 6 horas (meio período de um dia de trabalho, 12:00–18:00).

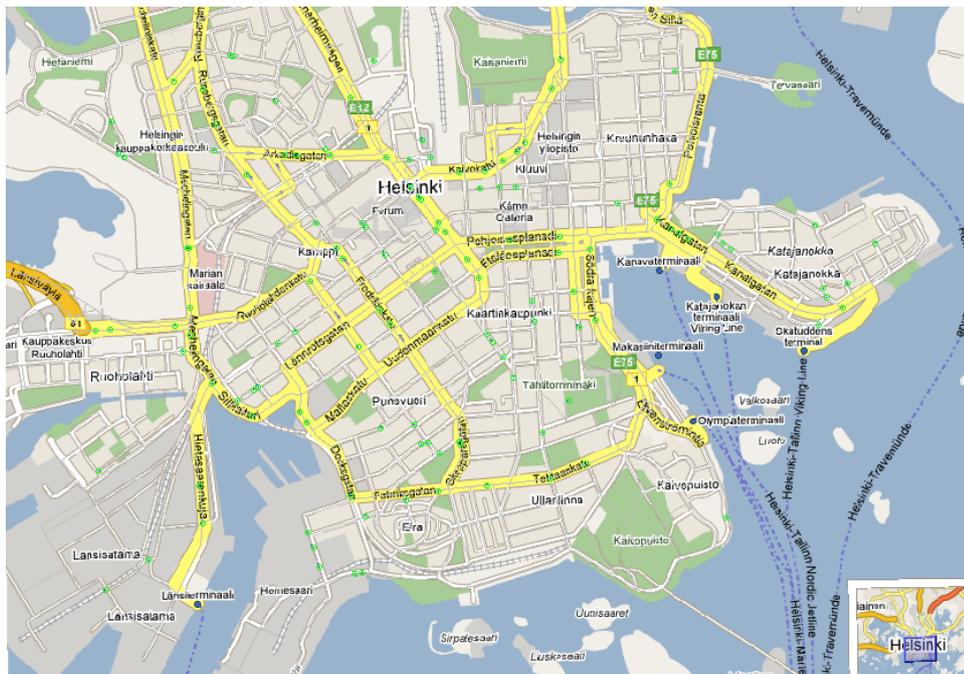


Figura 34: Simulador The ONE – Cidade de Helsinki – Arquitetura Veicular pura (V2V).

Para taxa de transmissão e raio de alcance das antenas de transmissão, foram uti-

lizadas as configurações de 2MB/s e 100 metros, tendo como base resultados apresentados por trabalhos que utilizaram o padrão IEEE 802.11p em ambientes reais (BARCELOS et al., 2014). Para o *buffer* de armazenamento dos nós optou-se por uma alta capacidade: 2GB, com intuito de que o *Epidemic* (também utilizado durante as simulações, seção 7.2) possa obter taxas de entrega e de atraso ideais. Outros parâmetros também foram definidos e usados durante os experimentos, eles são apresentados na tabela 8.

Tabela 8: Parâmetros de simulação

PARÂMETRO	VALOR
Área de Simulação	4.5km x 3.4km
Tempo de Simulação	6 horas
Número de Veículos	100
Tamanho das Mensagens	500kb-1MB
Armazenamento	2GB
Tempo de Vida das Mensagens	60 minutos
Taxa de Transmissão	2Mb/s
Raio de Alcance	100 metros
Velocidade dos Veículos	10-50km/h

Além dos parâmetros do ambiente de simulação também foi configurado, para o modelo de encaminhamento proposto pelo *V-SPORT*, mais duas métricas: (1) o valor máximo de réplicas transmitidas para cada mensagem ($MRT= 8$); e (2) o tempo de defasagem para a informação sobre a localização do destino ($TD= 1$ minuto). O MRT representa o número máximo de cópias de uma mensagem produzidas pelo algoritmo *V-SPORT*. O valor escolhido para o MRT baseia-se nos valores de replicação utilizados pela estratégia *Spray and Wait*, que variam, normalmente, entre 6 e 10 cópias. O TD representa o tempo a partir do qual a informação sobre a localização do destino (vinda do histórico de contatos) é considerada defasada e uma nova previsão deve ser efetuada. Para o TD foi utilizado o valor de 1 minuto, visto que um veículo trafegando a uma velocidade média de 60km/h se desloca aproximadamente 1km nesse período de tempo. Em outras palavras, um veículo com velocidade média de 60km/h já estaria, aproximadamente, 1km distante da última posição conhecida sobre ele. Portanto, após 1 minuto a estratégia *V-SPORT* considera que a última informação conhecida sobre a posição do destino encontra-se defasada, o que torna necessária uma nova previsão.

7.2 Metodologia e Procedimentos de Avaliação

Durante as simulações foram utilizadas as duas versões do *V-SPORT* descritas no capítulo 6, juntamente com uma terceira versão que utiliza a localização real do destino. A primeira faz uso dos modelos de previsão sobre a localização do destino e seleção do próximo cruzamento baseados na distância euclidiana. Ela foi denominada *V-SPORTG*. A segunda versão faz uso do modelo de previsão sobre a localização do destino baseado no deslocamento máximo (d_{max}) e do modelo de seleção do próximo cruzamento baseado na menor distância no mapa. Ela foi denominada *V-SPORTL*. A terceira versão faz uso apenas do modelo de encaminhamento (seleção do próximo cruzamento) baseado na distância euclidiana, já que considera que a posição atualizada do destino está disponível. Ela foi utilizada para que fosse possível comparar o desempenho das estratégias *V-SPORTG* e *V-SPORTL* com uma abordagem onde não há erro no modelo de previsão, possibilitando também verificar o comportamento delas na possibilidade de operarem, em algum momento, em ambientes que possuem infraestruturas e serviços externos. A terceira estratégia foi denominada *V-SPORTC*.

As três versões foram simuladas (em comparação) juntamente com outras duas estratégias de roteamento: *Direct Delivery* (SPYROPOULOS; PSOUNIS; RAGHAVENDRA, 2004) e *Epidemic* (VAHDAT; BECKER, 2000), que foram escolhidas pelos seguintes motivos:

1. As principais estratégias de roteamento (baseadas na posição) projetadas para redes veiculares (incluindo as estratégias apresentadas na tabela 7) utilizam como premissa a existência de infraestruturas externas ao longo dos cruzamentos das vias. Além disso eles também assumem que um serviço global de localização está disponível, permitindo que informações sobre a posição e velocidade de outros veículos sejam obtidas em qualquer lugar e a qualquer momento. Sendo assim, para um cenário de simulação utilizando uma arquitetura VDTN pura (V2V) seus modelos de roteamento não se aplicam.
2. A estratégia *Direct Delivery* possui um desempenho ideal no que diz ao *overhead* gerado durante o processo de roteamento. Portanto, quanto mais próximo o desempenho do *V-SPORT* for do desempenho apresentado pelo protocolo *Direct Delivery* para essa métrica, melhor será análise sobre o seu comportamento. Em contrapartida, a estratégia *Epidemic* é a mais conhecida entre os algoritmos de roteamento

projetados para o ambiente DTN, e tem seu funcionamento baseado em inundação (*flooding*). Ele pode ser utilizado em ambientes onde recursos como a largura de banda, energia e armazenamento não possuem restrições. Em outras palavras, a estratégia proposta pelo *Epidemic* apresenta o melhor desempenho possível para taxa de entrega de mensagens e para o atraso médio em condições ideais (e.g., buffer infinito). Além disso, ele é largamente utilizado como referência em comparações de desempenho (SEGUNDO; SILVA; FARINES, 2016). Portanto, quanto mais próximo o desempenho do *V-SPORT* for do desempenho apresentado pelo *Epidemic* para as métricas de taxa de entrega e atraso médio, melhor será análise sobre o seu comportamento. Com intuito de obter resultados ainda mais próximos do ideal uma versão melhorada da estratégia epidêmica foi utilizada durante o período de simulação, denominada *Epidemic Oracle*. Ela permite otimizar o uso do *buffer* de armazenamento, pois supõem que todos os nós sabem o momento em que as mensagens são entregues, e portanto descartam as cópias que estão armazenadas em buffer assim que a entrega é efetuada.

O procedimento de simulação escolhido, como proposto em (BALICO et al., 2015), foi projetado para analisar o desempenho do *V-SPORT* a partir de cinco diferentes fatores de impacto, denominados como: (1) impacto da variação da densidade de rede; (2) impacto da variação do raio de transmissão das antenas; (3) impacto da variação do tempo de vida (*TTL*) das mensagens; (4) impacto da variação da velocidade dos veículos; e (5) impacto da variação da capacidade de armazenamento dos veículos.

Para cada um dos cenários propostos foram efetuadas 10 simulações e calculadas as médias e margens de erro dos resultados obtidos com um nível de confiança de 95%.

7.3 Fatores de Impacto Avaliados

A heterogeneidade de cenários veiculares aos quais as estratégias de roteamento de mensagens estão expostas faz com que a variação dos principais parâmetros de simulação (ou características destes cenários) gera um impacto, normalmente negativo, sobre o desempenho dessas estratégias. Com intuito de avaliar o comportamento do *V-SPORT* diante dessas variações foram produzidos diferentes cenários de simulação de acordo com os cinco fatores de impacto descritos a seguir.

7.3.1 Densidade de Rede

No ambiente veicular a densidade de rede, ou número de veículos, pode variar rapidamente, visto que os nós podem trafegar por regiões mais densas e, ao dobrar uma determinada esquina, encontrar ruas com tráfego mais ou menos escasso. Nesse sentido, torna-se importante que as estratégias de roteamento sejam capazes de lidar com ambos os cenários, não apresentando uma variação muito brusca em seu desempenho quando o número de veículos diminui ou aumenta rapidamente.

Tendo como objetivo analisar o desempenho das estratégias *V-SPORT*, tanto em redes que apresentam tráfego de veículos esparsos quanto em redes que mostram-se mais densas, os experimentos utilizados para verificar o impacto da variação da densidade de rede foram iniciados com um baixo número de veículos, que foi aumentado a cada nova rodada de simulação. Os outros parâmetros mantiveram-se iguais aos mostrados na tabela 8. A quantidade de nós utilizada variou entre 100 a 300 veículos. Esses valores foram escolhidos porque as estratégias de roteamento VDTN (tabela 7) utilizadas como referência para o desenvolvimento do *V-SPORT* utilizam, em sua maioria, densidade de rede entre 100 e 260 veículos.

7.3.2 Raio de Alcance das Antenas

O raio de alcance das antenas de transmissão dos veículos nas redes veiculares e em ambientes urbanos é limitada pela presença de construções (casas e edifícios) e regiões arborizadas, podendo variar consideravelmente quando cenários reais são tema de estudo. Neste contexto, fica evidente a necessidade, por parte das estratégias de roteamento, em atingir desempenhos adequados ainda que os veículos estejam trafegando por regiões onde o raio de alcance das antenas seja afetado por algum tipo de obstáculo.

Mesmo sendo evidente que, quanto maior o raio de alcance maior será o número de veículos contatados, tendo como consequência uma maior taxa de entrega e um menor tempo médio de atraso obtidos pelas estratégias de roteamento, torna-se imprescindível avaliar o impacto que essa variação provoca sobre seu desempenho. Portanto, tendo como objetivo analisar o comportamento das estratégias *V-SPORT*, tanto para áreas urbanas abertas quanto para áreas urbanas que apresentam obstáculos ao sinal de transmissão das antenas, foram utilizados durante os experimentos raios de alcance variando entre 50 e 150 metros. Esses valores foram escolhidos porque experimentos reais utilizando a tecnologia IEEE 802.11p mostram que é possível manter a taxa de entrega de 2Mb/s com

raios de alcance variando entre 50 e 150 metros.

7.3.3 Tempo de Vida das Mensagens – *TTL*

As redes veiculares abrem possibilidades para o desenvolvimento de um largo número de serviços, desde aplicações voltadas para segurança do trânsito (que necessitam de baixas latências) até aplicativos de informação e entretenimento (que suportam médias e altas latências). Neste contexto, a análise da variação do tempo de vida das mensagens (*TTL*) torna-se importante a medida que ela permite compreender a aplicabilidade das estratégias de roteamento para cada tipo de serviço.

Sendo assim, no intuito de observar o comportamento das cinco estratégias quando o tempo de vida das mensagens se altera, foram produzidos experimentos onde o *TTL* das mensagens variou de 15 a 75 minutos. Esses valores de *TTL* foram escolhidos porque são considerados tempos de atraso que contemplam as necessidades, tanto de aplicações que precisam de menor latência (segurança e emergência – notificação à autoridades policiais), quanto aplicações que podem operar com latências mais extensas (informação e entretenimento – notícias e compartilhamento de conteúdo).

7.3.4 Velocidade dos Veículos

A existência de diferentes tipos de estradas e densidades de tráfego, onde os veículos podem se locomover com diferentes velocidades, exige que as estratégias de roteamento, propostas para o ambiente veicular, sejam capazes de lidar com esse tipo diversidade. A velocidade com que os veículos trafegam podem impactar no desempenho dos algoritmos em vários aspectos. Veículos trafegando com baixas velocidades demoram mais tempo para alcançar o destino de suas rotas e conseqüentemente aumentam o tempo médio de atraso de entrega e o tempo de disseminação de informações como, por exemplo, os dados armazenados e compartilhados sobre o histórico de contatos entre os veículos.

Neste contexto, e tendo como objetivo analisar o impacto da variação da velocidade dos veículos, foram produzidos experimentos nos quais os veículos utilizaram diferentes valores de velocidade, iniciando em 10 km/h e aumentando gradativamente até 90 km/h. Esses valores foram escolhidos porque são, aproximadamente, os valores de velocidade mínimo e máximo que veículos atingem quando estão trafegando por áreas urbanas.

7.3.5 Capacidade de Armazenamento em Buffer

As redes veiculares permitem que uma vasta gama de aplicações sejam desenvolvidas tendo como base as comunicações *V2V* e *V2I*. Essa grande quantidade de aplicações tende a gerar um número consideravelmente alto de mensagens, que acabam ocupando rapidamente a capacidade de armazenados de *buffer* dos veículos. Se considerarmos, ainda, que técnicas de replicação de mensagens são utilizadas com frequência pelas estratégias de roteamento, o gerenciamento de *buffer* torna-se essencial para que os modelos de encaminhamento consigam manter uma boa taxa entrega. A partir dessa premissa, e com intuito de avaliar o impacto da variação do tamanho do buffer de armazenamento, foram utilizados, durante essa etapa de experimentos, *buffers* com capacidades que variaram de 30MB a 110MB. Esses valores foram escolhidos levando em consideração os ambientes de simulação utilizados pelos principais protocolos DTN (seção 5.1), onde os nós possuem restrições quanto ao armazenamento em buffer.

Outro fator importante, que justifica a análise sobre o impacto da variação do tamanho *buffer*, é poder visualizar como o desempenho de alguns algoritmos de roteamento torna-se instável quando são testados fora de suas condições ideais. Por isso para essa etapa de simulações foi utilizada estratégia *Epidemic*, com intuito de verificar a instabilidade do seu modelo quando o mesmo está operando em cenários onde um dos parâmetros não é ideal. A estratégia *Epidemic* opera de maneira realista em comparação a *Epidemic Oracle*, ela não supõe que todos os nós tem ciência sobre a entrega das mensagens e descartam suas cópias armazenadas em buffer assim que a entrega é efetuada.

7.4 Métricas de Desempenho Avaliadas

As seguintes métricas de desempenho foram avaliadas durante os procedimentos de simulação:

- Taxa de Entrega: é a principal métrica de avaliação para ambientes altamente dinâmicos, onde particionamentos de rede e desconexões são frequentes. Como não há garantia, por parte das estratégias de roteamento, de que as mensagens serão entregues ao nó de destino, a taxa de entrega permite avaliar a eficiência das metodologias propostas por cada uma delas;
- *Overhead*: permite compreender o custo de rede gerado pelas técnicas de roteamento utilizadas por cada estratégia. O *overhead* apresenta a quantidade de transmissões

de mensagens produzidas para cada mensagem entregue. Algoritmos que apresentem altos valores de *overhead* consomem rapidamente recursos de rede (armazenamento, canal de comunicação), comprometendo sua eficiência (taxa de entrega) ao longo do tempo;

- **Latência Média:** ou atraso médio de entrega permite avaliar habilidade das estratégias de roteamento no que diz respeito a sua agilidade em rotear e entregar mensagens. Como as redes veiculares estão sujeitas a constantes desconexões, e não possuem caminho fim a fim, é aceitável que as mensagens sejam entregues com algum tempo de atraso. A avaliação dessa métrica em VDTN torna-se importante porque permite identificar quais estratégias são aplicáveis para quais tipos de aplicações. Alguns serviços suportam atrasos mais altos enquanto outros necessitam que as mensagens sejam entregues rapidamente.

7.5 Procedimentos de Simulação

O procedimento de simulação adotado para avaliar a estratégia *V-SPORT* foi dividido em duas etapas: (1) primeiramente foram efetuadas simulações e coletados resultados que permitissem avaliar de maneira individual o desempenho dos modelos de previsão e encaminhamento propostos pelo *V-SPORT*; (2) apenas num segundo momento a estratégia *V-SPORT* foi avaliada em sua plenitude, ou seja, foram utilizados todos os cinco fatores de impacto e analisadas as três métricas de desempenho. Para todos os cenários propostos foram efetuadas 10 simulações e calculadas as médias e margens de erro para os resultados obtidos, sendo utilizado um nível de confiança de 95%. Essa abordagem foi adotada para garantir confiabilidade matemática aos resultados obtidos.

7.5.1 Análise Individual dos Modelos de Previsão e Encaminhamento

Para a análise dos modelos de previsão e encaminhamento, as estratégias *V-SPORT* operaram sem o uso da replicação de mensagens, ou seja, elas utilizaram a técnica de cópia única. Baseado nessa avaliação buscou-se identificar: o erro produzido pelo modelo de previsão; a habilidade do modelo de encaminhamento em aproximar as mensagens do destino; e a melhoria alcançada para taxa de entrega quando comparado ao protocolo *Direct Delivery*, visto que ambos operam com o modelo de cópia única.

Utilizando o cenário e os parâmetros de simulação definidos na tabela 8 foram efetuadas simulações com as duas estratégias *V-SPORT* apresentadas na seção 6.1.3,

juntamente com a terceira estratégia *V-SPORT* que utiliza a informação real sobre a localização dos veículos de destino, denominada *V-SPORTC*. Ela foi utilizada porque permite comparar o desempenho dos modelos de previsão das estratégias *V-SPORTG* e *V-SPORTL* com um algoritmo que faz uso da posição real dos veículos de destino. Em outras palavras, é possível comparar os dois modelos com resultados considerados ideais para previsão da localização dos nós. Além das estratégias *V-SPORT* também foi utilizado o protocolo *Direct Delivery*, visto que ele gera resultados onde as mensagens trafegam sem qualquer influência de algoritmos de roteamento, o que permite quantificar as melhorias trazidas pelos modelos de previsão e encaminhamento propostos pelo *V-SPORT*.

A primeira análise efetuada diz respeito ao erro de previsão produzido pelos modelos propostos pelo *V-SPORTG* e *V-SPORTL*. A análise foi feita de acordo com a idade do último contato conhecido com o veículo de destino, onde foram coletados os valores dos erros de previsão de acordo com o tempo passado desde que as últimas informações conhecidas sobre o destino foram capturadas. A tabela 9 apresenta os erros de previsão obtidos para os seguintes tempos 0 – 60, 60 – 120, 120 – 180, 180 – 240 e 240 – 300 segundos.

A segunda análise efetuada teve como objetivo avaliar os modelos de encaminhamento. Ela foi feita num segundo momento porque a definição sobre como o encaminhamento das mensagens deve ocorrer tem como base a informação sobre a localização do destino obtida pelo modelo de previsão. Para avaliar o desempenho do modelo de encaminhamento, no intuito de comprovar que as mensagens são encaminhadas por rotas que as aproximam do destino, foram tabeladas as distâncias de todas as mensagens geradas ao longo da simulação de acordo com o seu tempo de vida. Em outras palavras, foram calculadas as médias das distâncias de todas as mensagens geradas para os tempos de vida de 0, 6, 12, 18, 24, 30, 36, 42, 48 e 54 minutos. Quando uma mensagem é entregue ao destino a distância para os tempos de vida posteriores ao momento de entrega é considerada nula (zero).

Após a coleta dos dados que permitiram analisar, de maneira individualizada, os modelos de previsão e encaminhamento, foram coletados dados para avaliar, de modo preliminar, o desempenho das estratégias de roteamento como um todo, ou seja, o funcionamento integrado dos dois modelos. Para tal, foram analisadas as taxas de entrega de mensagens do *V-SPORTG*, *V-SPORTL* e *V-SPORTC* em comparação com o *Direct Delivery*. Essa dinâmica foi adotada porque nessa etapa da avaliação as estratégias *V-SPORT* não utilizam replicação de mensagens, ou seja, assim como o *Direct Delivery* apenas a

mensagem original é disponibilizada e roteada até seu destino. A comparação com o *Direct Delivery* permite compreender o quanto, em desempenho de entrega, a estratégia *V-SPORT* é capaz de melhorar se comparado a um modelo, que assim como ele, faz uso da técnica de cópia única.

7.5.2 Análise Integral da Estratégia *V-SPORT*

Nesta etapa da simulação as estratégias *V-SPORTG* e *V-SPORTL* foram analisadas de maneira profunda, sendo coletados os resultados para as três métricas de avaliação propostas: taxa de entrega, *overhead* e latência. Essa abordagem tem por objetivo compreender o comportamento da arquitetura *V-SPORT* como um todo, ou seja, dos modelos de previsão e encaminhamento trabalhando conjuntamente no processo de roteamento de mensagens em ambientes veiculares tolerantes a atrasos e desconexões.

Sendo assim, para a análise integral das estratégias *V-SPORTG* e *V-SPORTL* elas foram submetidas aos cinco fatores de impacto: densidade de rede, raio e alcance das antenas, tempo de vida das mensagens (*TTL*), velocidade dos veículos e capacidade de armazenamento em buffer. Esse processo de simulação permitiu compreender, tanto os pontos fortes da arquitetura *V-SPORT* (cenários onde seu desempenho é ótimo), quanto as possíveis fragilidades da estratégia (cenários onde seu desempenho sofre oscilações).

7.6 Resultados Obtidos

Nas seções 7.6.1 e 7.6.2 são apresentados, em tabelas e gráficos, os resultados obtidos durante os experimentos considerando os procedimentos de simulação descritos acima.

7.6.1 Experimentos Iniciais: Análise Individualizada

A tabela 9 e a Figura 35 apresentam os resultados obtidos para o modelo previsão *V-SPORT*.

Analisando os resultados é possível perceber que quanto mais defasada a última informação conhecida sobre o veículo de destino, maior o erro obtido pelos modelos de previsão. Também é possível constatar que a predição proposta pela estratégia *V-SPORTL*, que utiliza o suporte de mapas digitais de vias para estimar a localização do veículo de destino, obteve melhores resultados (alcançando erros menores em sua previsão) para

informações com tempo de defasagem maior, mais especificamente a partir de três minutos, enquanto a estratégia *V-SPORTL* mostrou-se mais eficaz com tempos de defasagem menores, inferiores a três minutos.

Tabela 9: Erro (em metros) apresentado pelo modelo de previsão, considerando a idade do contato.

Tempo (seg)	V-SPORTG	V-SPORTL
0-60	136,80	229,90
60-120	359,60	512,70
120-180	683,80	668,60
180-240	977,10	747,30
240-300	1215,70	803,20
Margem de Erro		
0-60	5,76	6,79
60-120	9,01	7,08
120-180	7,41	6,25
180-240	15,09	3,37
240-300	12,57	9,73

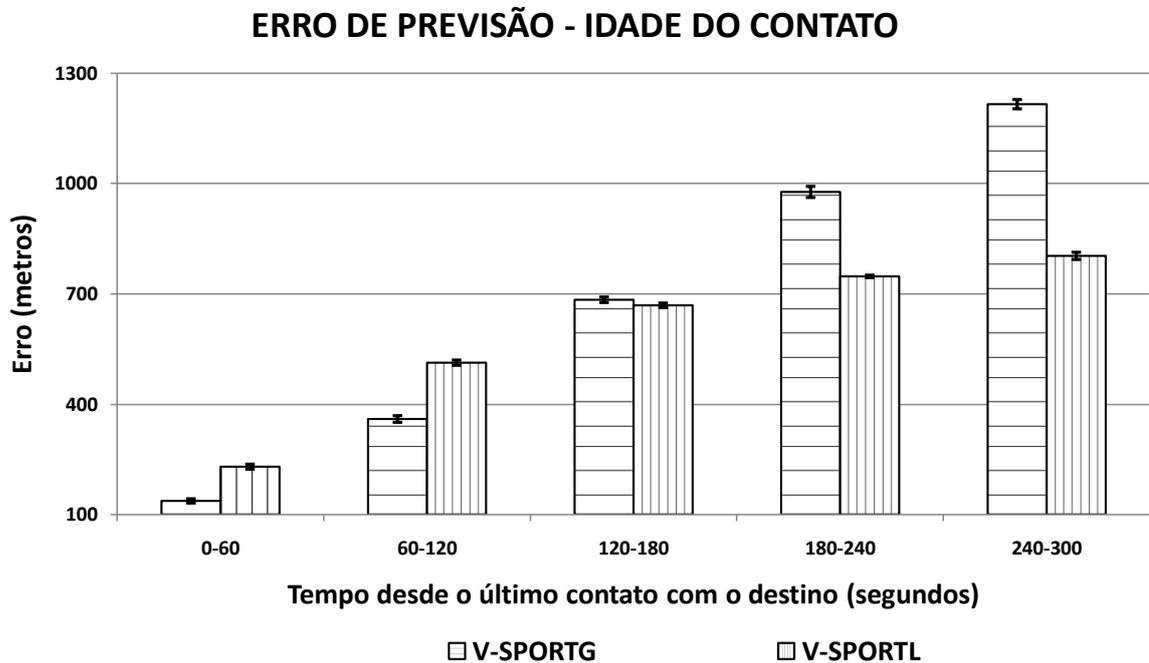


Figura 35: Erro (em metros) apresentado pelo modelo de previsão, considerando a idade do contato.

Considerando que modelos de encaminhamento de mensagens (baseados em posição) para redes veiculares tem por objetivo aproximá-las do veículo de destino, no intuito de efetuar contato com veículos que contém informações mais recentes sobre ele, os resul-

tados obtidos mostram-se favoráveis ao funcionamento adequado desse paradigma, visto que o modelo de previsão refina sua estimativa sempre que informações mais atualizadas sobre o destino são obtidas.

Os resultados obtidos para o modelo de encaminhamento, relacionado à aproximação das mensagens (em relação ao destino) ao longo do tempo, são apresentados na Tabela 10 e na Figura 36. Lembrando que, as estratégias *Direct Delivery* e *V-SPORTC* foram simuladas em conjunto com o *V-SPORTG* e o *V-SPORTL* porque permitem, respectivamente, visualizar como as mensagens trafegam pelas vias sem a interferência de um modelo de encaminhamento, e analisar o desempenho do modelo de encaminhamento *V-SPORT* na hipótese das informações geradas pelo modelo de previsão não conterem erros de estimativa.

Tabela 10: Aproximação (em metros) das mensagens ao longo do tempo com relação ao veículo de destino.

Tempo (min)	V-SPORTG	V-SPORTL	V-SPORTC	Direct Delivery
0	1301,90	1302,90	1300,10	1311,40
6	878,70	894,10	734,80	1285,20
12	679,80	692,00	507,40	1269,50
18	529,90	543,40	362,10	1240,30
24	403,50	413,40	257,30	1220,50
30	314,00	321,20	175,50	1199,10
36	246,40	245,60	125,90	1175,40
42	192,40	183,00	86,50	1151,40
48	148,30	139,30	57,30	1138,70
54	113,80	110,80	42,40	1113,50
	Margem	de	Erro	
0	12,39	12,59	12,88	12,46
6	17,57	15,15	9,30	19,16
12	10,13	18,60	9,52	15,34
18	27,40	17,45	9,17	14,86
24	21,27	18,24	8,79	13,49
30	19,09	16,19	7,80	6,98
36	14,25	13,80	11,17	20,32
42	12,84	13,15	8,80	11,15
48	11,68	12,48	4,69	17,90
54	9,92	7,27	4,02	13,79

Analisando os resultados apresentados na Tabela 10 e na Figura 36 é possível verificar que os modelos de encaminhamento propostos pela estratégia *V-SPORT* aproximam as mensagens de seus destinos ao longo o tempo quando comparado a trajetória normal que elas tomariam sem a interferência de um modelo de encaminhamento, caso

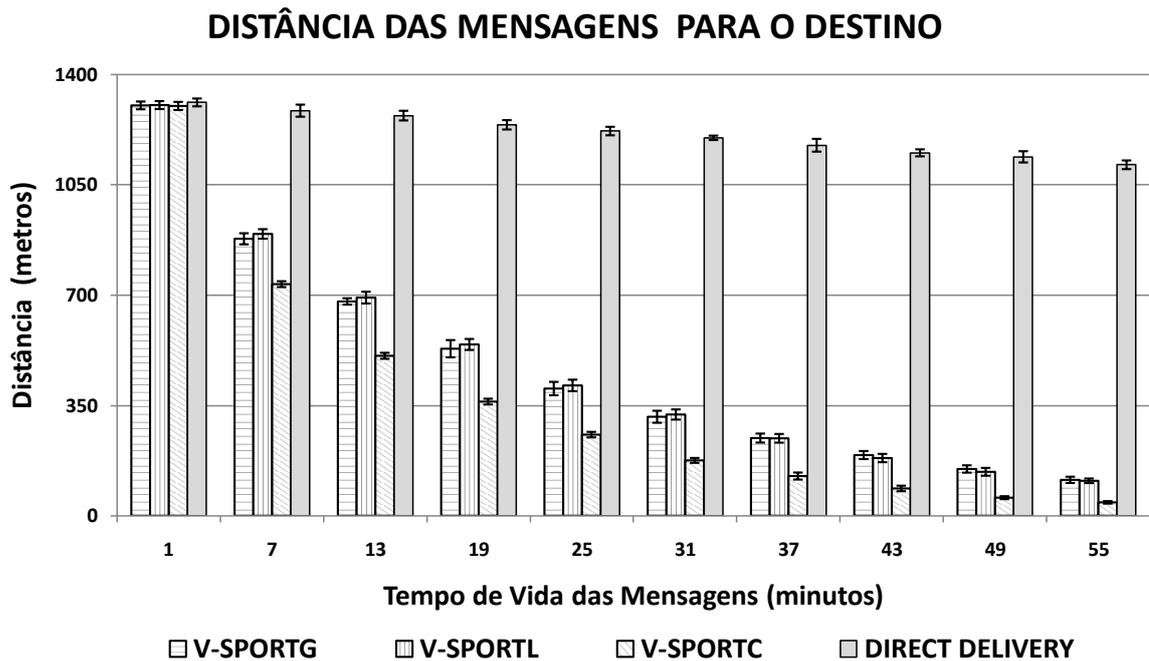


Figura 36: Aproximação (em metros) das mensagens, ao longo do tempo, com relação ao veículo de destino.

dos resultados obtidos para o protocolo *Direct Delivery*. Os desempenhos alcançados pelos modelos do *V-SPORTG* e *V-SPORTL* são muito similares. Em contrapartida, o *V-SPORTC* apresentou melhores resultados, fazendo uso da localização real dos veículos de destino, o que evidencia a importância que a exatidão do modelo de previsão tem sobre a eficácia do modelo de encaminhamento das mensagens.

Os resultados preliminares, coletados para analisar o desempenho dos modelos de previsão e encaminhamento trabalhando em conjunto e com a técnica de cópia única, são apresentados na Tabela 11 e na Figura 37.

Tabela 11: Taxa de entrega de mensagens (em porcentagem).

V-SPORTG	V-SPORTL	V-SPORTC	Direct Delivery
85,40	85,31	91,53	64,18
Margem de Erro			
0,97	0,26	0,60	1,27

Através da análise da Tabela 11 e da Figura 37 é possível perceber que utilizando o modelo de previsão e encaminhamento de mensagens propostos pelo *V-SPORTG*, *V-SPORTL*, onde apenas a mensagem original trafega pela rede, a taxa de entrega foi elevada em aproximadamente 21% quando comparado com o *Direct Delivery*, alcançando resultados próximos a 85%. A estratégia *V-SPORTC*, que utiliza a localização real do veículo

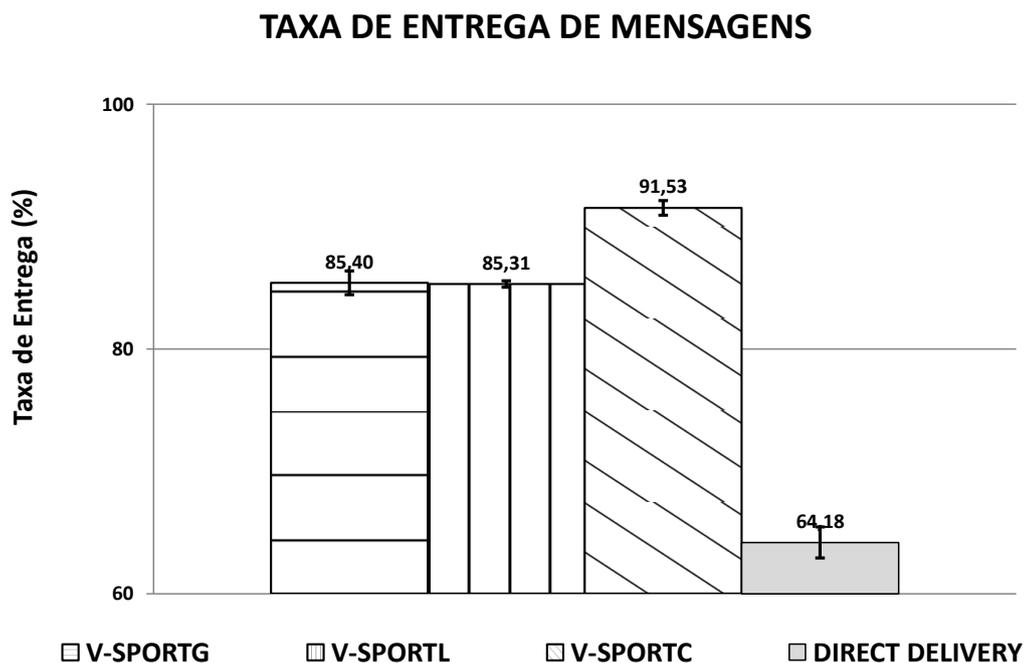


Figura 37: Taxa de entrega de mensagens para os modelos de previsão e encaminhamento.

de destino, foi ainda mais eficiente, elevando a taxa de entrega em 26% e alcançando resultados próximos a 91%.

Os melhores resultados alcançados pela estratégia *V-SPORTC* estão vinculados a duas características de funcionamento: (1) supor que a informação sobre a localização do destino está disponível sempre que necessário, não sendo preciso estimá-la, o que lhe permite operar sem erros de previsão; (2) não necessitar de um tempo de aquecimento inicial (*warm up*), onde os veículos efetuam contatos entre si, para dar início ao encaminhamento das mensagens, visto que não utiliza um modelo de previsão e já possui previamente a informação sobre a localização do destino da mensagem.

Considerando essa segunda característica foram coletadas informações sobre a taxa de entrega de mensagens das estratégias *V-SPORTG* e *V-SPORTL* durante os períodos de 0 a 30 minutos e de 30 minutos a 6 horas de simulação. O objetivo foi observar o desempenho das duas estratégias após um determinado período de aquecimento, estimado em 30 minutos. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 12 e na Figura 38.

Pelo desempenho apresentado é possível verificar que a taxa de entrega das estratégias *V-SPORTG* e *V-SPORTL* é muito baixa durante o período inicial (0 - 30 minutos) de simulação, momento onde os nós ainda não possuem informações sobre todos

Tabela 12: Taxa de entrega de mensagens (em porcentagem) após 30 minutos.

Intervalo	V-SPORTG	V-SPORTL
0 - 30 min.	37,79	37,41
30 min. - 6h	89,55	89,47
Margem de Erro		
0 - 30 min.	3,55	4,69
30 min. - 6h	0,94	0,62

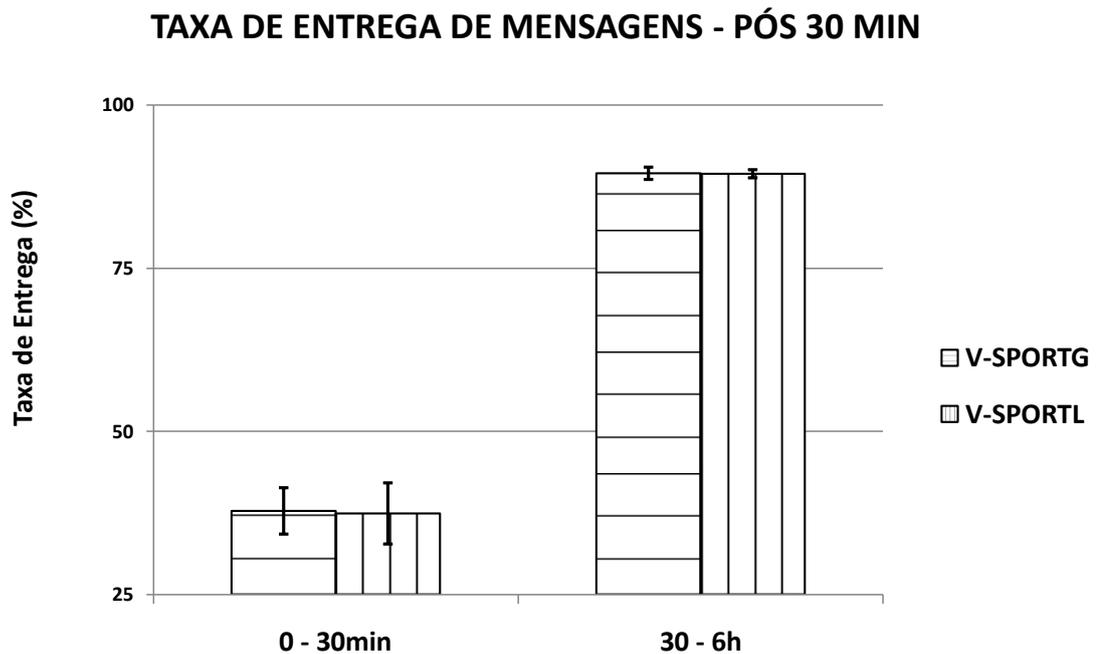


Figura 38: Taxa de entrega de mensagens após 30 minutos.

os veículos de destino, não sendo capazes de estimar sua localização e encaminhar as mensagens. Contudo, após esse período de aquecimento, as duas estratégias apresentam resultados ainda melhores aqueles obtidos na Tabela 11, onde a taxa de entrega alcançou resultados na faixa de 90%, valores muito próximos aos obtidos anteriormente pela estratégia *V-SPORTC*.

Pela análise dos resultados preliminares obtidos, e tendo como intuito otimizar o desempenho das estratégias *V-SPORTG* e *V-SPORTL*, compensando a imperfeição dos modelos de previsão, optou-se por adotar a técnica de replicação de mensagens controlada, limitando o número de réplicas espalhadas pela rede em 8, num modelo similar ao número de cópias adotado pela estratégia *Spray and Wait*. O objetivo principal é possibilitar que as duas estratégias alcancem resultados similares aos produzidos pelo *V-SPORTC* ao longo das próximas etapas de avaliação. As seções a seguir apresentam uma análise

mais completa sobre as estratégias de roteamento *V-SPORT*, considerando três métricas de desempenho: taxa de entrega, atraso médio e *overhead*, e cinco fatores de impacto: densidade de rede, raio de transmissão, tempo de vida das mensagens (*TTL*), velocidade dos veículos e *buffer* de armazenamento.

7.6.2 Experimentos Finais: Análise Conjunta

Para essa etapa da simulação foram analisados os desempenhos das estratégias de roteamento *V-SPORT* em sua totalidade (Previsão + Encaminhamento). Elas foram testadas dentro dos cinco fatores de impacto.

7.6.2.1 O impacto da variação da densidade de rede – Número de veículos

Os resultados obtidos para as três métricas de desempenho (taxa de entrega, *overhead* e latência) são apresentados nas Tabelas 13, 14 e 15 e nas Figuras 39, 40 e 41.

Tabela 13: O impacto da variação da densidade de rede sobre a taxa de entrega (em porcentagem).

Nr. de Veículos	V-SPORTG	V-SPORTL	V-SPORTC	Direct Delivery	Epidemic Oracle
100	96,90	96,79	97,21	64,18	98,65
150	97,00	96,70	97,39	63,79	98,97
200	97,17	97,17	97,40	66,23	99,11
250	96,96	96,89	97,26	64,99	99,25
300	97,17	96,78	97,20	64,80	99,22
	Margem	de	Erro		
100	0,22	0,20	0,22	1,27	0,09
150	0,24	0,29	0,20	1,09	0,14
200	0,18	0,44	0,25	0,93	0,15
250	0,21	0,27	0,23	1,19	0,11
300	0,15	0,36	0,39	1,02	0,10

Analisando os desempenhos obtidos para métrica da taxa de entrega de mensagens (Tabela 13 e Figura 39) é possível observar que os modelos de encaminhamento utilizados pelas estratégias *V-SPORT* obtiveram resultados muito próximos entre si e próximos aos resultados obtidos pela estratégia *Epidemic Oracle* (considerado ideal para taxa de entrega) durante todas as densidades de rede utilizadas. A variação da densidade de rede não gerou impacto sobre o desempenho das estratégias *V-SPORT* no que diz respeito a taxa de entrega de mensagens, visto que ela se manteve praticamente estável durante todos

cenários nos quais a quantidade de veículos foi incrementada. As outras duas estratégias de roteamento também apresentaram esse mesmo comportamento.

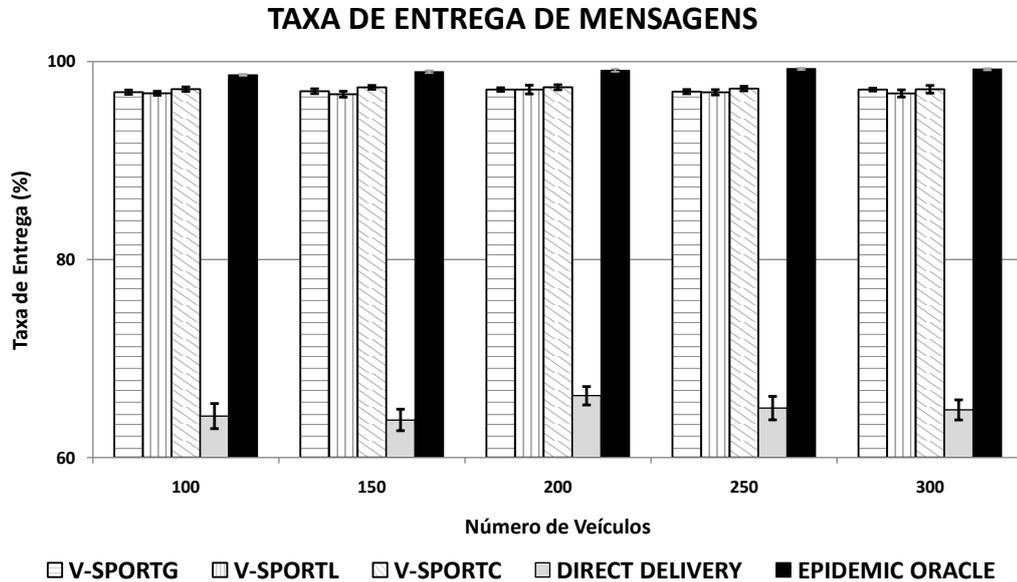


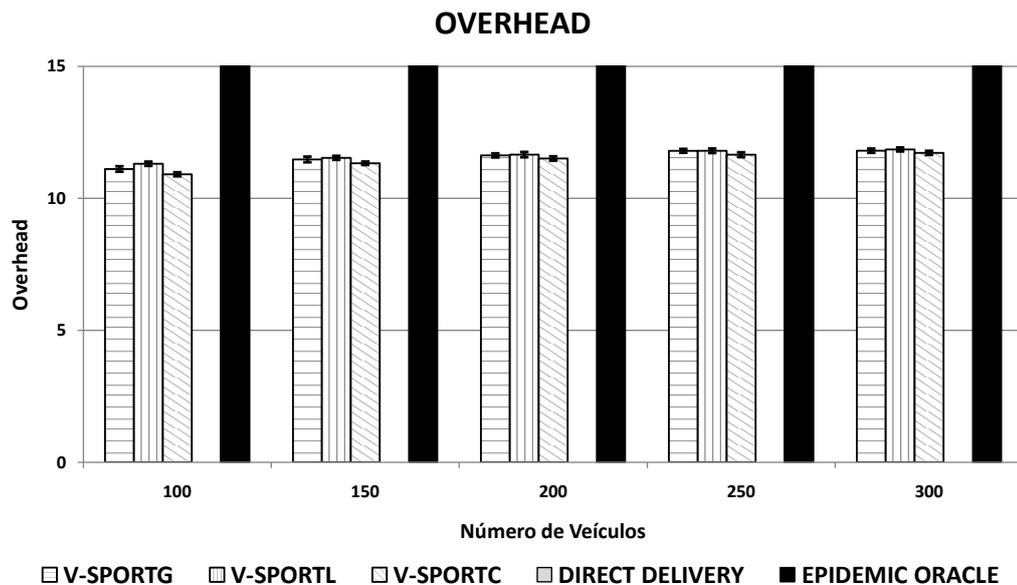
Figura 39: O impacto da variação da densidade de rede sobre a taxa de entrega.

Outra consideração importante, sobre as estratégias *V-SPORT*, está no fato de que as abordagens que utilizam modelo de previsão para localização do destino, *V-SPORTG* e *V-SPORTL*, atingiram desempenho similar a abordagem *V-SPORTC*, que utiliza a localização real do destino. Esse resultado mostra, para o fator de impacto em questão, que o modelo de roteamento proposto pelo *V-SPORT* é capaz de prover roteamento, com a mesma qualidade, tanto em cenários onde serviços de localização estão disponíveis, quanto em cenários onde esses serviços não existem. Em outras palavras, o modelo de previsão proposto, baseado no histórico de encontros, é capaz de alcançar praticamente os mesmos resultados que abordagem baseada na localização real dos veículos de destino.

Os resultados obtidos para *overhead* são apresentados na Tabela 14 e na Figura 40. Analisando os dados coletados é possível constatar que as estratégias *V-SPORT* tiveram um desempenho muito mais próximo ao obtido pela estratégia *Direct Delivery* (considerado ideal para esta métrica de avaliação) para todas as densidades de rede simuladas. Além disso o *overhead* das três estratégias *V-SPORT* mantiveram-se estáveis ao longo de toda a simulação, não sofrendo impacto algum quanto a variação da densidade de rede.

Tabela 14: O impacto da variação da densidade de rede sobre o *overhead*.

Nr. de Veículos	V-SPORTG	V-SPORTL	V-SPORTC	Direct Delivery	Epidemic Oracle
100	11,11	11,31	10,91	0,00	145,79
150	11,47	11,53	11,33	0,00	218,88
200	11,62	11,65	11,51	0,00	295,37
250	11,80	11,80	11,65	0,00	370,17
300	11,80	11,85	11,72	0,00	445,69
	Margem	de	Erro		
100	0,10	0,08	0,08	0,00	1,13
150	0,11	0,07	0,06	0,00	1,83
200	0,08	0,10	0,08	0,00	1,59
250	0,07	0,08	0,09	0,00	1,48
300	0,08	0,07	0,08	0,00	2,25

Figura 40: O impacto da variação da densidade de rede sobre o *overhead*.

Por outro lado, se analisarmos os resultados obtidos pela estratégia *Epidemic Oracle* percebemos que ela apresentou um *overhead* de 10 a 40 vezes maior que o obtido pelas estratégias *V-SPORT*, ao mesmo tempo que atingiu taxas de entrega muito próximas. Além disso, a estratégia *Epidemic Oracle* mostrou-se muito impactada pela variação da densidade de rede, onde seu desempenho de *overhead* chegou a alcançar uma variação de aproximadamente 300% se compararmos a simulação com menor densidade (100 veículos) e a simulação com maior densidade (300 veículos). Isso mostra que muitas estratégias possuem um modelo de roteamento que atinge ótimos desempenhos para

uma determina métrica dentro de um determinado cenário, e que a variação de certos parâmetros faz com elas apresentem comportamentos irregulares e obtenham resultados inadequados.

Outra informação importante a ser ressaltada, sobre os resultados apresentados, é que a estratégia adotada pelo *Direct Delivery* não gera *overhead*. Isso acontece porque a única transmissão feita pelos veículos, quando estão executando seu algoritmo, é exatamente aquela utilizada durante a entrega da mensagem ao seu destinatário final. Em outras palavras, ele não produz transmissões redundantes.

Os resultados obtidos para latência ou atraso médio são apresentados na Tabela 15 e na Figura 41.

Tabela 15: O impacto da variação da densidade de rede sobre a latência média (em minutos).

Nr. de Veículos	V-SPORTG	V-SPORTL	V-SPORTC	Direct Delivery	Epidemic Oracle
100	8,63	8,42	7,82	20,28	4,48
150	7,58	7,69	6,83	20,05	3,61
200	7,03	7,10	6,31	20,00	2,93
250	6,63	6,99	5,93	21,26	2,41
300	6,33	6,71	5,70	20,35	1,89
	Margem	de	Erro		
100	0,23	0,17	0,22	0,69	0,06
150	0,06	0,15	0,13	1,09	0,05
200	0,15	0,41	0,18	0,93	0,08
250	0,26	0,24	0,19	1,19	0,06
300	0,16	0,11	0,09	1,02	0,05

O desempenho das estratégias *V-SPORT* mais uma vez mostraram-se mais próximos dos resultados obtidos pelo protocolo *Epidemic Oracle* (considerado ideal para esta métrica de avaliação) durante toda a simulação. Além disso, novamente as estratégias *V-SPORT* apresentaram estabilidade de desempenho, não sofrendo impacto pela variação da densidade de rede, a mesma estabilidade também pôde ser vista na estratégia *Direct Delivery*. As estratégias *V-SPORT* obtiveram, ainda, desempenhos levemente superiores para latência média quando a densidade de rede aumentou. A estratégia *Epidemic Oracle* apresentou uma estabilidade menor, visto que no cenário com menor quantidade de veículos ele atingiu valores de atraso aproximadamente 3 vezes maiores que o cenário contendo o maior número de veículos.

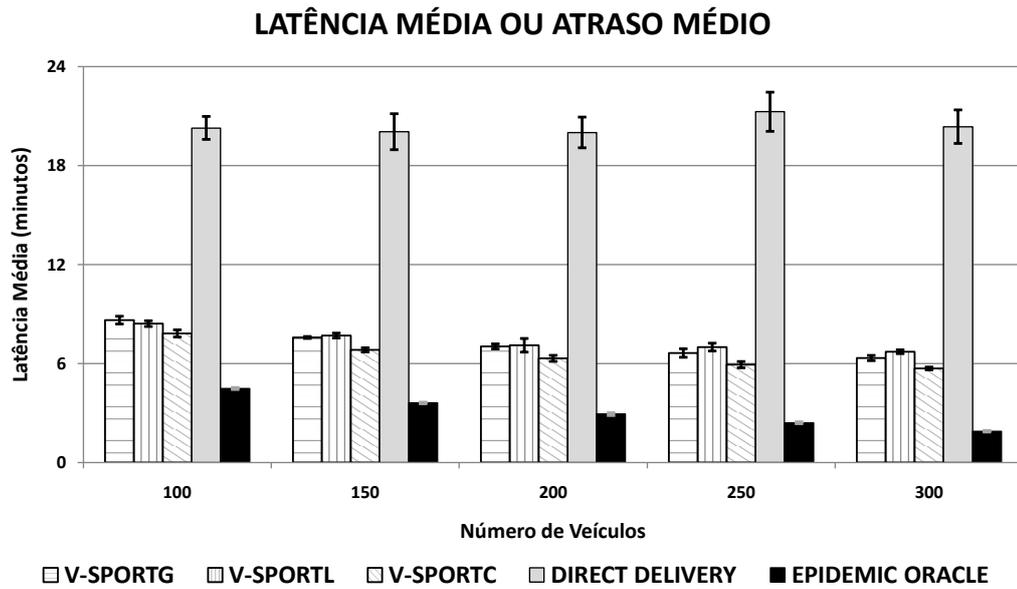


Figura 41: O impacto da variação da densidade de rede sobre a latência média.

As estratégias *V-SPORT* baseadas nos modelos de previsão da localização do destino apresentaram, também para o atraso médio, resultados muito próximos aos obtidos pela estratégia *V-SPORT* baseada na localização real do destino. Entretanto, ao contrário da taxa de entrega e do *overhead*, para latência média é possível visualizar uma leve vantagem da estratégia *V-SPORTC* sobre as estratégias *V-SPORTG* e *V-SPORTL*.

Apesar dos resultados de atraso médio das estratégias *V-SPORT* estarem mais próximas do ideal ao longo de todas as simulações para o fator de impacto da variação da densidade, o desempenho da estratégia *Epidemic Oracle* mostra-se consideravelmente superior. Esse resultado está atrelado ao fato do *Epidemic* disseminar mensagens por todas as rotas possíveis, sempre encontrando o veículos destino no menor tempo possível. Tal abordagem, por outro lado, leva-o a atingir um *overhead* tão elevado. Adicionalmente a isso, as estratégias *V-SPORT* necessitam, inicialmente, de um período de aquecimento que acarreta no aumento do atraso médio de entrega.

7.6.2.2 O impacto da variação do raio de transmissão

Os resultados obtidos para as três métricas de desempenho (taxa de entrega, *overhead* e latência) são apresentados nas Tabelas 16, 17 e 18 e nas Figuras 42, 43 e 44.

Tabela 16: O impacto da variação do raio de alcance das antenas sobre a taxa de entrega de mensagens (em porcentagem).

Raio (metros)	V-SPORTG	V-SPORTL	V-SPORTC	Direct Delivery	Epidemic Oracle
50	95,17	95,38	95,81	53,42	98,21
75	96,03	96,00	96,50	58,79	98,47
100	96,90	96,79	97,21	64,18	98,65
125	97,40	97,29	97,57	70,40	98,83
150	97,64	97,64	97,90	74,58	99,10
Margem de Erro					
50	0,40	0,56	0,38	1,58	0,22
75	0,32	0,29	0,31	1,22	0,15
100	0,22	0,20	0,22	1,27	0,09
125	0,15	0,27	0,15	1,13	0,13
150	0,27	0,27	0,21	1,18	0,09

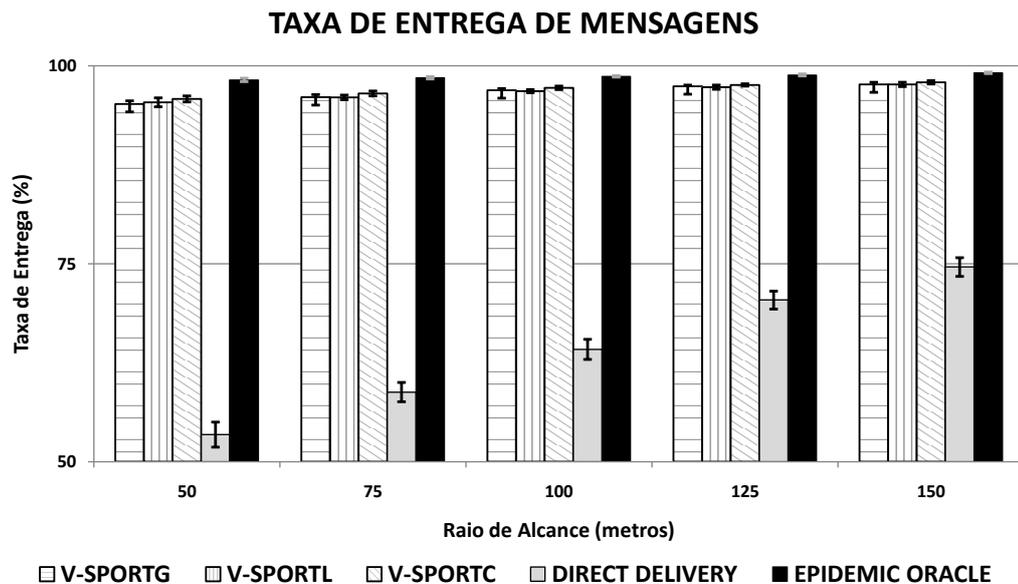


Figura 42: O impacto da variação do raio de alcance das antenas sobre a taxa de entrega de mensagens.

Analisando os dados da Tabela 16 e da Figura 42 é possível observar que as estratégias *V-SPORT*, mais uma vez, alcançaram uma taxa de entrega muito próxima dos resultados obtidos pelo protocolo *Epidemic Oracle* (ideal) para todos os raios de transmissão utilizados. Elas também apresentaram desempenho praticamente estável para taxa de entrega, em outras palavras, a variação do raio de alcance das antenas não impactou sobre o desempenho das estratégias *V-SPORT*, que tiveram apenas uma pequena melhora no desempenho quando expostas a raios de alcance maiores, algo esperado. O *Epidemic*

Oracle apresentou o mesmo comportamento, não sofrendo impacto sobre seu desempenho para taxa de entrega quando o raio de alcance das antenas varia.

Por outro lado, efetuando uma análise sobre o comportamento da estratégia *Direct Delivery* percebemos que a variação do raio de alcance tem forte impacto sobre o seu desempenho de entrega. Isso mostra, mais uma vez, o quanto pequenas variações para determinados parâmetros (típicas em ambientes reais) podem afetar de maneira consistente as estratégias de roteamento. Se olharmos os resultados do *Direct Delivery* para os cenários com menor (50m) e maior (150m) raios de alcance fica nítida a instabilidade da estratégia, que reduz sua taxa de entrega em aproximadamente 21%.

A Tabela 17 e na Figura 44 apresentam os resultados obtidos pelas estratégias para o *overhead*.

Tabela 17: O impacto da variação do raio de alcance das antenas sobre o *overhead*.

Raio (metros)	V- SPORTG	V- SPORTL	V- SPORTC	Direct Delivery	Epidemic Oracle
50	11,62	11,75	11,33	0,00	145,20
75	11,35	11,53	11,12	0,00	145,33
100	11,11	11,31	10,91	0,00	145,79
125	10,86	11,03	10,70	0,00	145,70
150	10,71	10,85	10,56	0,00	145,86
	Margem	de	Erro		
50	0,11	0,10	0,09	0,00	0,65
75	0,10	0,08	0,08	0,00	0,85
100	0,10	0,08	0,08	0,00	1,13
125	0,09	0,10	0,09	0,00	1,02
150	0,08	0,07	0,08	0,00	0,77

Mais uma vez, as estratégias *V-SPORT* atingiram, ao longo de todos os experimentos, resultados muito mais próximos aos obtidos pela estratégia *Direct Delivery*, considerada ideal. Além disso, elas apresentaram comportamento estável, ou seja, a variação do raio de alcance não impactou nos resultados de *overhead*, que mantiveram-se praticamente iguais em todos os cenários. Ainda com relação ao comportamento, tanto a estratégia *Epidemic Oracle* quanto a *Direct Delivery* mostraram-se estáveis a variação do raio de alcance no que diz respeito ao *overhead* produzido.

Uma análise comparativa entre os resultados de *overhead* produzidos pelas estratégias *V-SPORT* e a estratégia *Epidemic Oracle* mostram que essa última gera uma sobrecarga 10 a 12 vezes maior sobre a rede, gerando uma quantidade excessiva de transmissões redundantes ao mesmo tempo que atingi uma taxa de entrega apenas levemente

superior (algo em torno de 2%).

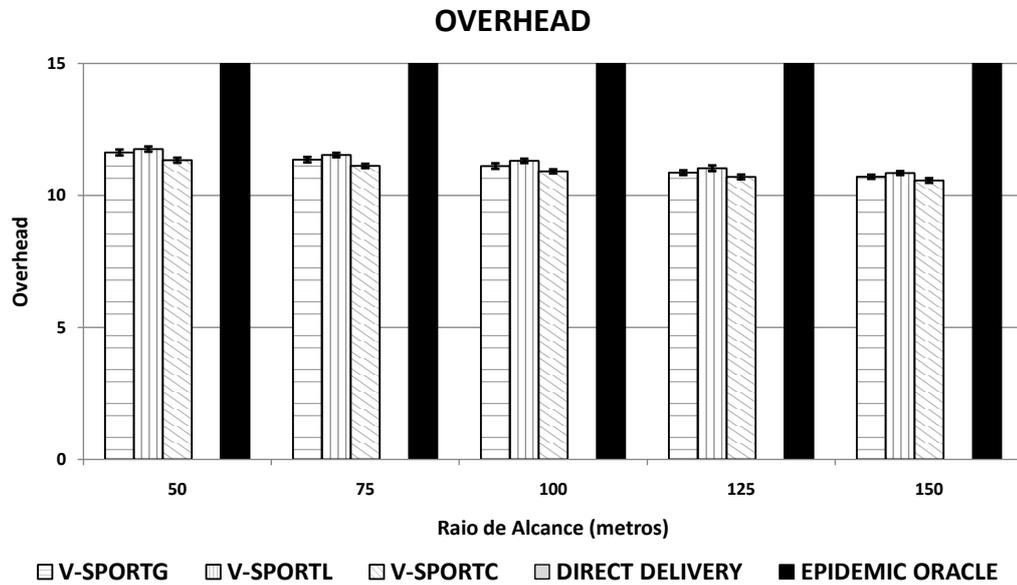


Figura 43: O impacto da variação do raio de alcance das antenas sobre o *overhead*.

A Tabela 18 e a Figura 44 apresentam os resultados obtidos pelas cinco estratégias para latência ou atraso médio. Para essa métrica as estratégias *V-SPORT* também obtiveram resultados mais próximos aos apresentados pelo *Epidemic Oracle* (ideal).

Tabela 18: O impacto da variação do raio de alcance das antenas sobre a latência ou atraso médio (em minutos).

Raio (metros)	V-SPORTG	V-SPORTL	V-SPORTC	Direct Delivery	Epidemic Oracle
50	11,62	11,46	10,26	22,70	5,85
75	9,98	9,88	8,95	21,65	5,21
100	8,63	8,42	7,82	20,28	4,48
125	7,45	7,35	6,72	19,15	3,73
150	6,61	6,73	6,15	18,07	2,94
Margem de Erro					
50	0,23	0,28	0,20	1,13	0,09
75	0,25	0,24	0,25	0,88	0,06
100	0,23	0,17	0,22	0,69	0,06
125	0,18	0,24	0,21	0,65	0,05
150	0,15	0,15	0,11	0,48	0,06

O desempenho para o atraso médio mostrou-se inversamente proporcional ao tamanho do raio de alcance das antenas ao longo das simulações. Em outras palavras, quanto maior o raio de alcance menor o tempo médio de atraso de entrega apresentado

pelas estratégias *V-SPORT*. Para métrica de atraso, o *V-SPORT* mostra que seu desempenho sofre um impacto considerável quando o raio de alcance varia, tendo uma diferença de 50% nos tempos de atraso para o maior (150m) e menor (50m) raio. Situação idêntica pôde ser observada para a estratégia *Epidemic Oracle*. Embora seja evidente que as estratégias alcançam melhores resultados quando os raios são maiores, a variação de desempenho apresentada pelas estratégias *V-SPORT* foi considerável, podendo ser objeto de estudo no futuro, com intuito de evitar que essa variação seja tão contundente.

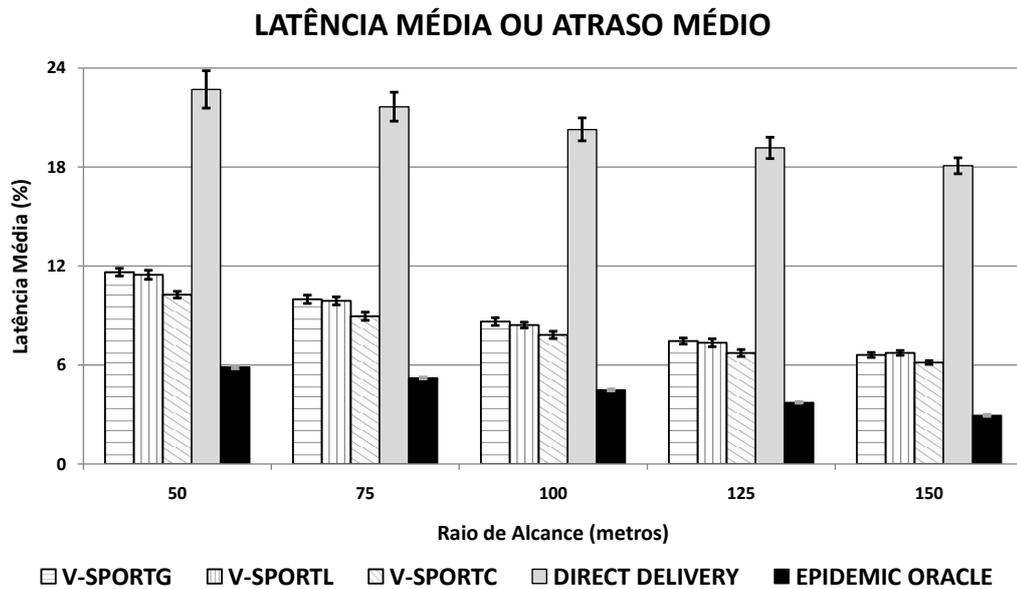


Figura 44: O impacto da variação do raio de alcance das antenas sobre a latência ou atraso médio.

As estratégias *V-SPORT* obtiveram, para mais um fator de impacto, resultados próximos aos obtidos pelos algoritmos de roteamento considerados ideias (dentro dos cenários propostos) para cada uma das métricas avaliadas. Além disso, as estratégias *V-SPORTG* e *V-SPORTL*, que fazem uso de um modelo de previsão sobre a localização do destino, alcançaram desempenhos praticamente semelhantes ao obtido pela estratégia *V-SPORTC*, mostrando, novamente, a capacidade do *V-SPORT* de prover roteamento em diferentes cenários de comunicação, como V2V puro ou híbrido (V2V + V2I).

7.6.2.3 O impacto da variação do tempo de vida das mensagens – *TTL*

Os resultados obtidos para as três métricas de desempenho (taxa de entrega, *overhead* e latência) são apresentados nas Tabelas 19, 20 e 21 e nas Figuras 45, 46 e 47.

Tabela 19: O impacto da variação do *TTL* (em minutos) sobre a taxa de entrega (em porcentagem).

TTL (minutos)	V- SPORTG	V- SPORTL	V- SPORTC	Direct Delivery	Epidemic Oracle
15	74,38	74,58	79,00	25,11	98,65
30	93,51	93,39	94,70	42,85	98,65
45	96,35	96,14	96,75	55,77	98,65
60	96,90	96,79	97,21	64,18	98,65
75	96,97	96,92	97,35	70,25	98,65
	Margem	de	Erro		
15	0,88	0,74	1,46	0,87	0,09
30	0,57	0,47	0,39	1,13	0,09
45	0,21	0,23	0,22	1,06	0,09
60	0,22	0,20	0,22	1,27	0,09
75	0,22	0,22	0,22	0,93	0,09

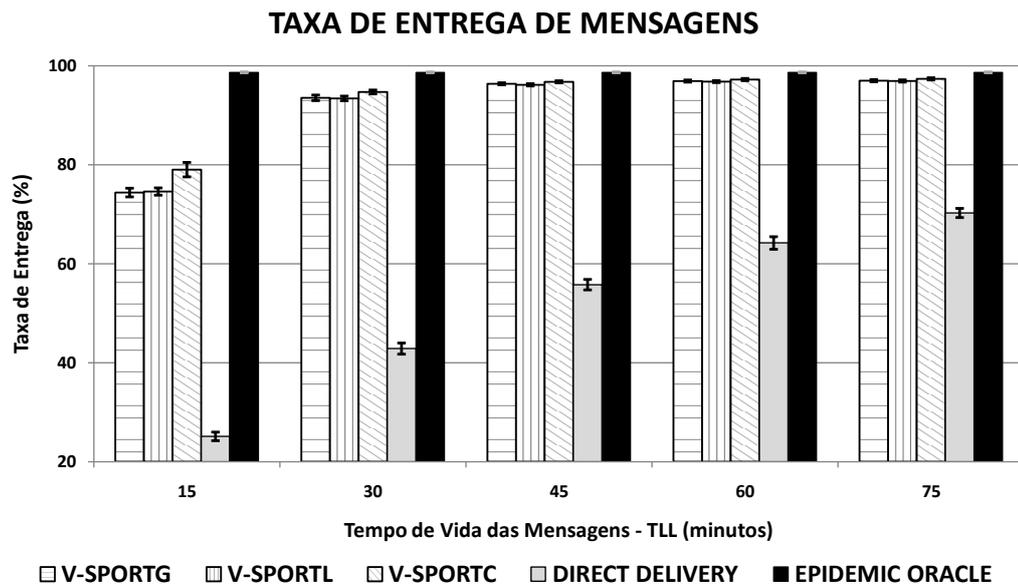


Figura 45: O impacto da variação do *TTL* sobre a Taxa de Entrega.

Pela análise dos resultados da taxa de entrega é possível verificar que as estratégias *V-SPORT* apresentam uma taxa de entrega próxima ao ideal (*Epidemic Oracle*) ao longo de praticamente todo o experimento, exceto onde o *TTL* é muito baixo – *TTL* = 15 minutos. Sendo assim, o desempenho da estratégia *V-SPORT*, para taxa de entrega, sofreu impacto da variação do tempo de vida das mensagens, especificamente para o experimento que utilizou o menor valor de *TTL*. Esse comportamento está atrelado a dois fatores: (1) as estratégias *V-SPORT* tem seu modelo de previsão baseado no histórico de encontros, que necessita de um tempo inicial de aquecimento para que os veículos

efetuam contatos e armazenem informações em suas *TICs*. Esse tempo faz com que muitas mensagens tenham seu *TTL* esgotado antes que o modelo de encaminhamento seja capaz de roteá-las até o destino; (2) como os veículos estão em constante movimento, tanto a estimativa sobre o destino quanto a seleção do próximo cruzamento que compõe a rota de entrega são refinados ao longo do roteamento, isso faz com que um certo intervalo de tempo seja necessário até que as mensagens alcancem seu destino.

O fator relacionado ao modelo de previsão pode ser constatado pelos melhores resultados (cerca de 5% superior) apresentados pela estratégia *V-SPORTC* quando o tempo de vida das mensagens é de 15 minutos. Contudo, ainda que apresente um desempenho superior as estratégias *V-SPORTG* e *V-SPORTL* é possível verificar que o resultado obtido para o $TTL = 15$ estão muito aquém dos resultados obtidos para os outros *TTLs* do experimento, que possuem valores superiores. Isso mostra que o modelo de encaminhamento também necessita de determinado intervalo de tempo para entregar a mensagem e por isso influencia no resultado abaixo do esperado para o $TTL = 15$. É possível perceber, pelos resultados coletados, que o *Direct Delivery* também possui comportamento irregular para variação do *TTL*, porém com desempenho muito instável para todos os experimentos efetuados. Já o *Epidemic Oracle* apresentou desempenho estável, para taxa de entrega, para todos os valores de *TTL* utilizados, mostrando que a variação não gerou qualquer efeito sobre o seu comportamento.

Os resultados coletados para o *overhead* são apresentados na Tabela 20 e na Figura 46.

Tabela 20: O impacto da variação do *TTL* (em minutos) sobre o *overhead*.

TTL (minutos)	V- SPORTG	V- SPORTL	V- SPORTC	Direct Delivery	Epidemic Oracle
15	13,73	14,27	12,75	0,00	131,68
30	11,51	11,72	11,19	0,00	145,77
45	11,17	11,38	10,96	0,00	145,79
60	11,11	11,31	10,91	0,00	145,79
75	11,10	11,29	10,89	0,00	145,78
	Margem	de	Erro		
15	0,21	0,19	0,23	0,00	0,95
30	0,12	0,12	0,10	0,00	1,13
45	0,11	0,08	0,08	0,00	1,13
60	0,10	0,08	0,08	0,00	1,13
75	0,10	0,08	0,08	0,00	1,12

Assim como nos fatores de impacto anteriores o *overhead* gerado pelas estratégias

V-SPORT ficaram muito mais próximo aos resultados apresentados pelo *Direct Delivery*, sendo muito menores que os valores obtidos pela estratégia *Epidemic Oracle*, aproximadamente 10 a 12 vezes menor. O comportamento do *V-SPORT* mostrou-se estável, ou seja, a variação do *TTL* não gerou impactos significativos no seu desempenho para o *overhead*, com valores levemente superiores apenas para o $TTL = 15$. Esse leve aumento está atrelado ao fato de que, apesar do modelo de encaminhamento efetuar um dado número de transmissões ao longo do roteamento das mensagens, muitas delas acabam tendo seu *TTL* expirado pouco antes de alcançarem o veículo de destino. O *Epidemic Oracle*, mais uma vez, obteve desempenho muito ruim para métrica de *overhead*, atrelado a sua metodologia de encaminhar cópias de mensagens por todos os caminhos possíveis, no intuito de maximizar a taxa de entrega e o atraso médio.

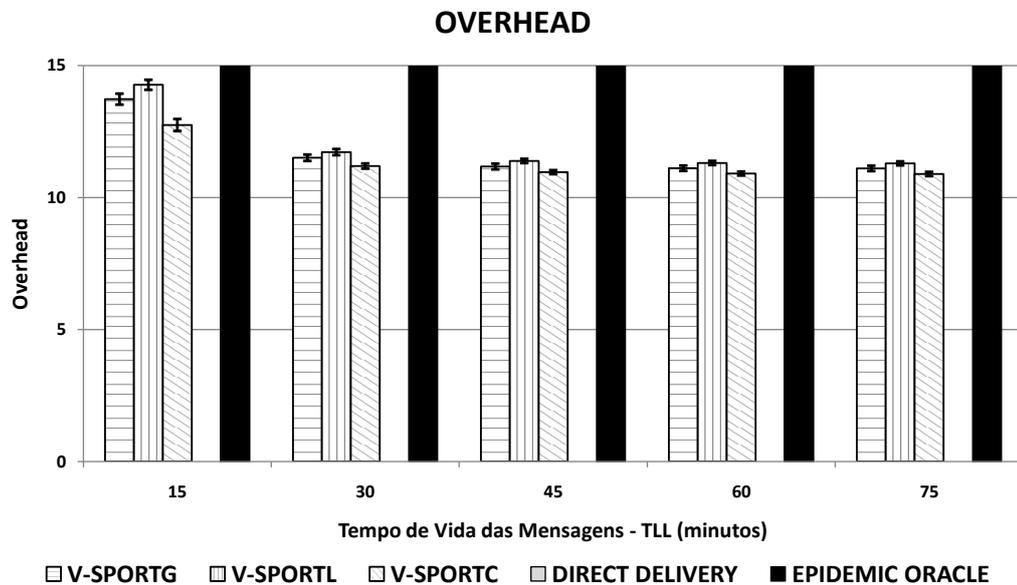


Figura 46: O impacto da variação do *TTL* sobre o *overhead*.

Os resultados obtidos para latência são apresentados na Tabela 21 e na Figura 47. O atraso gerado pelas estratégias *V-SPORT* ficou mais próximo aos resultados apresentados pelo *Epidemic Oracle* (ideal) em todas as etapas de simulação, exceto para o tempo de vida de 15 minutos. Isso deve-se ao fato de que as mensagens entregues pelo protocolo *Direct Delivery* quando o $TTL = 15$ são aquelas onde os veículos de origem encontram-se próximos dos veículos destino, encontrando-os rapidamente antes que o tempo de vida da mensagem expire.

Tabela 21: O impacto da variação do *TTL* (em minutos) sobre a latência média (em minutos).

TTL (minutos)	V- SPORTG	V- SPORTL	V- SPORTC	Direct Delivery	Epidemic Oracle
15	6,73	6,59	6,45	6,68	4,48
30	8,38	8,13	7,65	12,03	4,48
45	8,59	8,37	7,79	16,90	4,48
60	8,63	8,42	7,82	20,28	4,48
75	8,63	8,43	7,83	22,67	4,48
Margem de Erro					
15	0,15	0,14	0,17	0,32	0,06
30	0,23	0,14	0,22	0,42	0,06
45	0,24	0,18	0,23	0,50	0,06
60	0,23	0,17	0,22	0,69	0,06
75	0,23	0,17	0,22	0,82	0,06

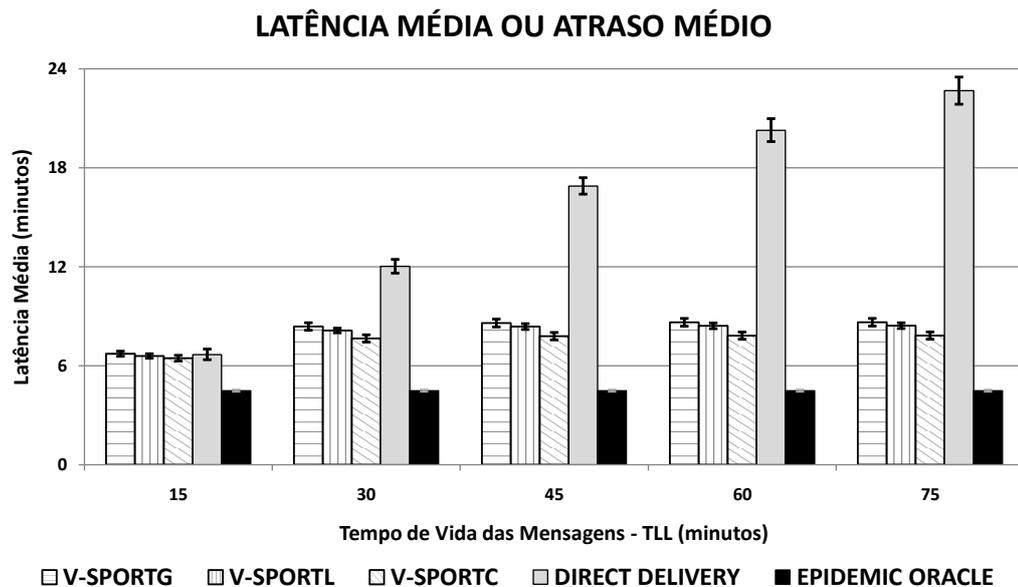


Figura 47: O impacto da variação do *TTL* sobre a latência média.

As estratégias *V-SPORT* apresentaram comportamento estável para o atraso médio, não sofrendo impacto significativo pela variação do *TTL*, o mesmo comportamento pôde ser visto para o *Epidemic Oracle*. Em contrapartida, a estratégia *Direct Delivery* mostrou-se extremamente instável para o atraso médio quando o *TTL* das mensagens varia, tendo valores de atraso três vezes maiores do experimento com maior *TTL* para o experimento com menor *TTL*.

7.6.2.4 O impacto da variação da velocidade dos veículos

Os resultados obtidos para as três métricas de desempenho (taxa de entrega, *overhead* e latência) são apresentados nas Tabelas 22, 23 e 24 e nas Figuras 48, 49 e 50.

Tabela 22: O impacto da variação da velocidade dos veículos sobre a taxa de entrega de mensagens (em porcentagem).

Velocidade (Km/h)	V-SPORTG	V-SPORTL	V-SPORTC	Direct Delivery	Epidemic Oracle
10	84,92	85,47	87,58	34,93	96,45
30	95,54	95,24	95,64	54,64	98,15
50	96,90	96,79	97,21	64,18	98,65
70	97,35	97,43	97,49	71,12	98,81
90	97,64	97,46	97,84	75,58	98,83
Margem de Erro					
10	0,98	0,79	0,75	0,91	0,30
30	0,32	0,31	0,16	0,46	0,21
50	0,22	0,20	0,22	1,27	0,09
70	0,33	0,17	0,31	1,03	0,16
90	0,20	0,31	0,19	0,95	0,11

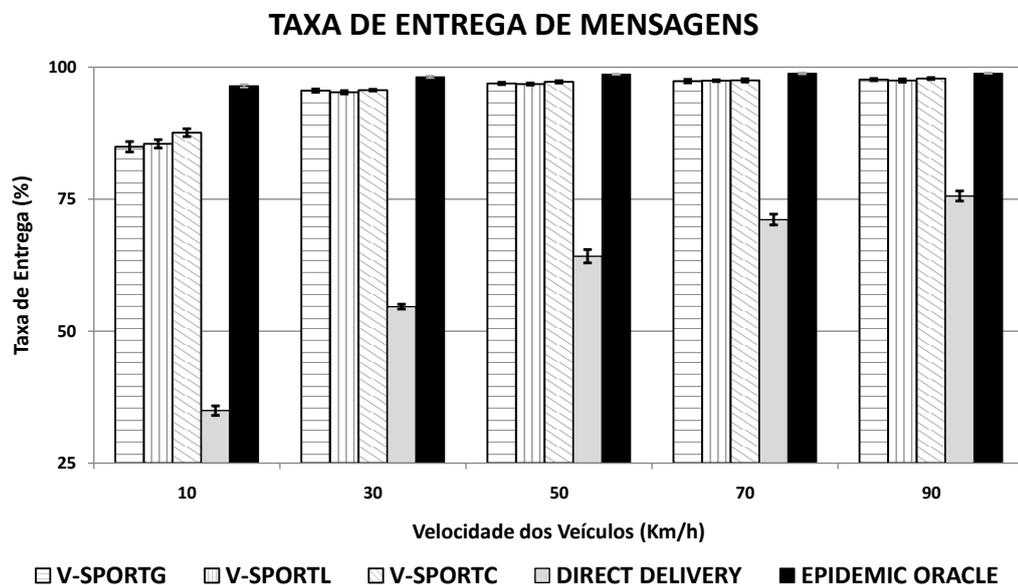


Figura 48: O impacto da variação da velocidade dos veículos sobre a taxa de entrega de mensagens.

Para variação da velocidade dos veículos, as estratégias *V-SPORT* apresentaram mais uma vez, para métrica de taxa de entrega, desempenhos mais próximos do ideal (*Epidemic Oracle*) ao longo de todos os experimentos. O comportamento das estratégias

V-SPORT também mostrou-se estável, não sofrendo grande impacto durante a variação da velocidade, exceto pelo experimento onde os veículos utilizaram velocidade de 10 km/h. Esse comportamento está atrelado ao fato de que, quanto mais lentamente os veículos se locomovem, maior será o tempo necessário para que os contatos entre os veículos ocorram e, por consequência, mais tempo será preciso para que as informações armazenadas nas *TICs* sejam compartilhadas. Por outro lado, em redes veiculares tolerantes a atrasos e desconexões, são raros os cenários onde os veículos trafegam com velocidade constante de 10 km/h. Normalmente, esses cenários estão ligados a grandes congestionamentos, típico das Redes Veiculares ad hoc, que são totalmente conectadas.

Os resultados obtidos pela estratégia *Direct Delivery* mostram que seu desempenho sofreu impacto significativo para o fator relativo a variação da velocidade dos veículos. Do experimento com maior velocidade para o experimento com menor velocidade a taxa de entrega chegou a cair pela metade. Em contrapartida, o comportamento do *Epidemic Oracle* mostrou-se estável, alcançando altas taxas de entrega para todos os experimentos, com uma pequena queda (2%) também quando os veículos trafegaram com velocidade de 10 km/h.

O overhead gerado por cada uma das estratégias é apresentado na Tabela 23 e Figura 49.

Tabela 23: O impacto da variação da velocidade dos veículos sobre o *overhead*.

Velocidade (Km/h)	V- SPORTG	V- SPORTL	V- SPORTC	Direct Delivery	Epidemic Oracle
10	11,41	11,63	10,57	0,00	144,23
30	11,07	11,28	10,86	0,00	145,17
50	11,11	11,31	10,91	0,00	145,79
70	11,10	11,25	10,92	0,00	145,95
90	11,12	11,31	11,00	0,00	145,98
	Margem	de	Erro		
10	0,10	0,08	0,11	0,00	0,96
30	0,10	0,12	0,11	0,00	1,08
50	0,10	0,08	0,08	0,00	1,13
70	0,09	0,09	0,10	0,00	0,63
90	0,11	0,08	0,08	0,00	0,66

Assim como visto nos fatores de impacto anteriores, as estratégias de roteamento *V-SPORT* produziram valores de *overhead* mais próximos do ideal ao longo de todos os experimentos. Além disso, elas também apresentaram comportamento estável, não sendo impactadas, no *overhead* produzido, pela variação da velocidade dos veículos. O

Epidemic Oracle também apresentou comportamento estável, porém atingiu valores de *overhead* extremamente elevados, sendo aproximadamente 14 vezes maior que os valores obtidos pelas estratégias *V-SPORT*.

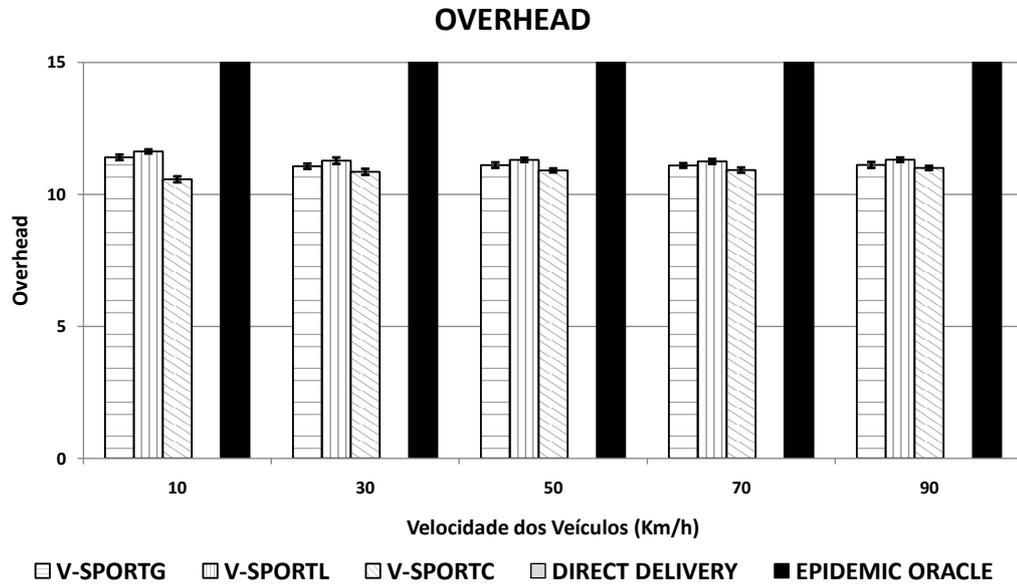


Figura 49: O impacto da variação da velocidade dos veículos sobre o *overhead*.

O resultado obtido para o atraso médio de entrega é apresentado na Tabela 24 e na Figura 50.

Tabela 24: O impacto da variação da velocidade dos veículos sobre a latência média (minutos).

Velocidade (Km/h)	V-SPORTG	V-SPORTL	V-SPORTC	Direct Delivery	Epidemic Oracle
10	21,60	20,85	19,65	24,22	11,23
30	11,27	11,41	10,39	20,81	6,18
50	8,63	8,42	7,82	20,28	4,48
70	7,00	6,95	6,37	18,20	3,61
90	6,07	6,01	5,51	17,90	3,11
Margem de Erro					
10	0,75	0,34	0,46	1,07	0,19
30	0,29	0,23	0,30	0,92	0,10
50	0,23	0,17	0,22	0,69	0,06
70	0,22	0,18	0,14	0,67	0,06
90	0,17	0,12	0,16	0,60	0,07

As estratégias *V-SPORT* apresentaram o mesmo comportamento, para o atraso médio, que haviam obtido para a taxa de entrega. Em outras palavras, o atraso médio

para os experimentos que utilizaram velocidade de 10 km/h foram maiores que os resultados obtidos para as demais velocidades simuladas. Como comentado anteriormente, os veículos trafegando em velocidades muito baixas, demoram mais tempo para alcançar seu destino final, que por consequência aumentam a latência média. Isso pode ser constatado também pelos resultados obtidos pela estratégia *Epidemic Oracle* que, apesar de atingir valores considerados ideais, teve seu atraso médio aumentado em 3 a 4 vezes se comparado o desempenho obtido para velocidade de 10 km/h com o desempenho obtido para velocidade de 90 km/h.

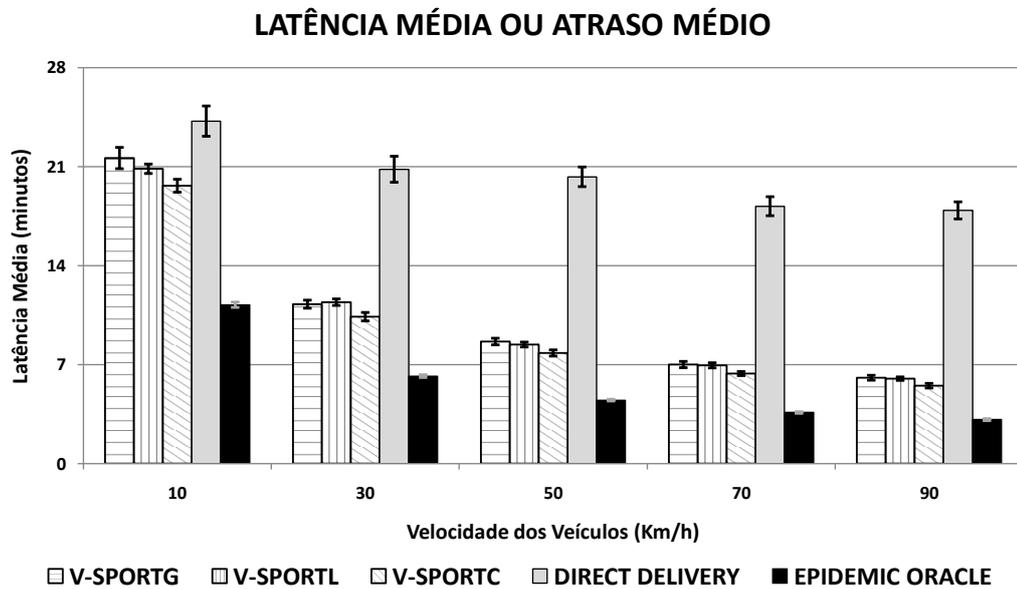


Figura 50: O impacto da variação da velocidade dos veículos sobre a latência média.

Para as demais velocidades, as estratégias *V-SPORT* alcançaram resultados mais próximos ao ideal (*Epidemic Oracle*) em todos os experimentos, apresentando um comportamento estável. A estratégia *V-SPORTC* apresentou, assim como para os outros fatores de impacto, resultados levemente superiores aos obtidos pelas estratégias *V-SPORTG* e *V-SPORTL*. Isso mostra que aprimoramentos nos modelos de previsão podem otimizar o processo de roteamento baseado no histórico de encontros.

7.6.2.5 O impacto da variação do buffer de armazenamento

Os resultados obtidos para as três métricas de desempenho (taxa de entrega, *overhead* e latência) são apresentados nas Tabelas 25, 26 e 27 e nas Figuras 51, 52 e 53.

Tabela 25: O impacto da variação do buffer de armazenamento sobre a taxa de entrega (em porcentagem).

Buffer (MB)	V-SPORTG	V-SPORTL	V-SPORTC	Direct Delivery	Epidemic
30	96,90	96,79	97,21	64,18	59,85
50	96,90	96,79	97,21	64,18	78,33
70	96,90	96,79	97,21	64,18	91,97
90	96,90	96,79	97,21	64,18	98,61
110	96,90	96,79	97,21	64,18	98,57
	Margem	de	Erro		
30	0,22	0,20	0,22	1,27	0,73
50	0,22	0,20	0,22	1,27	0,76
70	0,22	0,20	0,22	1,27	0,35
90	0,22	0,20	0,22	1,27	0,10
110	0,22	0,20	0,22	1,27	0,15

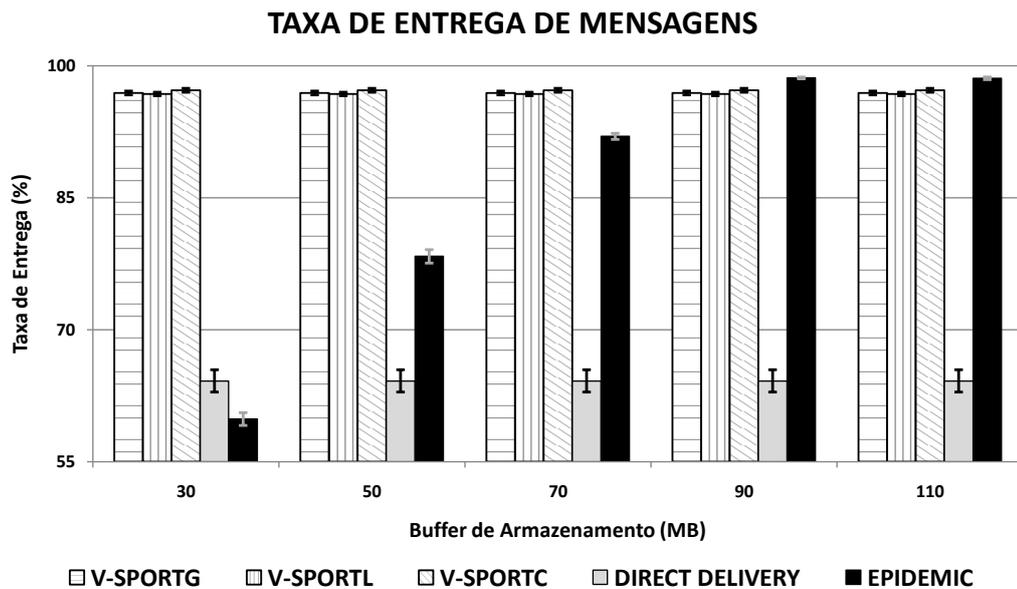


Figura 51: O impacto da variação do buffer de armazenamento sobre a taxa de entrega.

Já no início dos resultados obtidos pelo *Epidemic*, para taxa de entrega, mostram a instabilidade que as estratégias apresentam a pequena variação de um determinado parâmetro de simulação. Ao contrário dos fatores de impacto anteriores, o *Epidemic* chegou a apresentar taxas de entrega inferiores ao *Direct Delivery* para tamanhos de buffer muito reduzidos (30MB). Isso ocorre porque o uso da replicação não controlada consome rapidamente os recursos de armazenamento dos veículos, obrigando-os a descartar mensagens que ainda não haviam sido entregues ao seu destino. Conforme o tamanho de buffer é aumentado, o *Epidemic* consegue melhorar seu desempenho, alcançando resultados re-

levantados durante os dois últimos experimentos.

Por outro lado, as estratégias *V-SPORT* apresentam os melhores resultados para a taxa de entrega nos três primeiros experimentos, onde o buffer de armazenamento varia entre 30MB e 70MB. Para as duas últimas etapas, buffers de 90MB e 110MB, os resultados obtidos pelas estratégias *V-SPORT* são muito próximos ao *Epidemic*, mas levemente inferiores. Além disso, é possível notar que a variação da capacidade de armazenamento não impactou em nada o *V-SPORT*, que alcançou os mesmos resultados para todos os experimentos, mostrando mais uma vez um comportamento extremamente estável. O mesmo pôde ser visto para a estratégia *Direct Delivery* no que diz respeito ao seu comportamento.

O *overhead* gerado pelas estratégias é apresentado na Tabela 26 e na Figura 52.

Tabela 26: O impacto da variação do buffer de armazenamento sobre o *overhead*.

Buffer (MB)	V-SPORTG	V-SPORTL	V-SPORTC	Direct Delivery	Epidemic
30	11, 11	11, 31	10, 91	0, 00	1628, 49
50	11, 11	11, 31	10, 91	0, 00	1389, 18
70	11, 11	11, 31	10, 91	0, 00	1039, 42
90	11, 11	11, 31	10, 91	0, 00	98, 09
110	11, 11	11, 31	10, 91	0, 00	97, 32
	Margem	de	Erro		
30	0, 22	0, 20	0, 22	1, 27	0, 73
50	0, 22	0, 20	0, 22	1, 27	0, 76
70	0, 22	0, 20	0, 22	1, 27	0, 35
90	0, 22	0, 20	0, 22	1, 27	0, 10
110	0, 22	0, 20	0, 22	1, 27	0, 15

Novamente a estratégia *Epidemic* demonstrou ser extremamente instável a variação da capacidade de armazenamento em buffer. De maneira surpreendente ela chegou a apresentar variações extremas onde os resultados obtidos para o experimento com menor tamanho de buffer (30MB) chegou a atingir valores 15 vezes maiores que os obtidos para o maior tamanho de buffer (110MB). Se avaliarmos as taxas de entrega, para os dois menores tamanhos de buffer, observa-se que há um consumo (custo) extremamente alto de recursos de rede para obtenção de uma baixa taxa de entregar (benefício). Torna-se ainda pior a avaliação do comportamento do modelo *Epidemic*, se compararmos seus resultados aos obtidos pelas estratégias *V-SPORT*, ele chega a produzir um *overhead* 100 a 150 vezes maior nos primeiros três experimentos, onde o tamanho de buffer varia entre 30MB e 70MB, e valores 9 vezes maiores quando os tamanhos de buffer são de 90MB e 110MB.

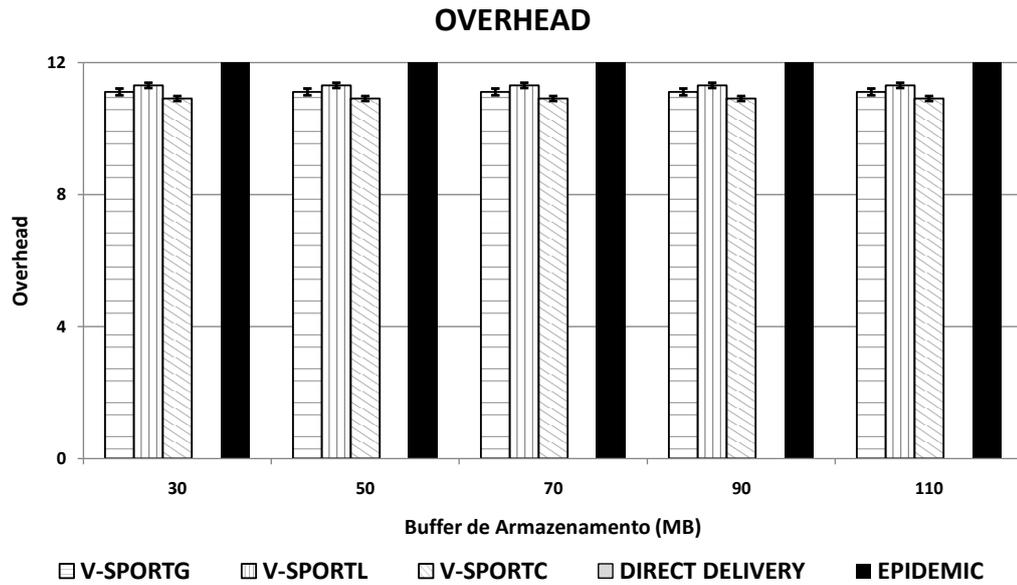


Figura 52: O impacto da variação do buffer de armazenamento sobre o *overhead*.

Por outro lado, as estratégias *V-SPORT* apresentam resultados mais próximos ao ideal (*Direct Delivery*) e comportamento totalmente estável, sem sofrer qualquer impacto pela variação do tamanho do buffer. Como visto ao longo de toda etapa de simulação, os desempenhos apresentados pelas estratégias *V-SPORTG* e *V-SPORTL* são praticamente idênticos aos obtidos pela estratégia *V-SPORTC*, ainda que levemente inferiores.

Os resultados obtidos para o atraso médio produzido por cada uma das estratégias são apresentados na Tabela 27 e na Figura 53.

Tabela 27: O impacto da variação do buffer de armazenamento sobre a latência ou atraso médio (em minutos).

Buffer (MB)	V-SPORTG	V-SPORTL	V-SPORTC	Direct Delivery	Epidemic
30	8,63	8,42	7,82	20,28	8,11
50	8,63	8,42	7,82	20,28	7,54
70	8,63	8,42	7,82	20,28	6,34
90	8,63	8,42	7,82	20,28	4,60
110	8,63	8,42	7,82	20,28	4,60
	Margem	de	Erro		
30	0,23	0,17	0,22	0,69	0,21
50	0,23	0,17	0,22	0,69	0,19
70	0,23	0,17	0,22	0,69	0,11
90	0,23	0,17	0,22	0,69	0,07
110	0,23	0,17	0,22	0,69	0,07

As estratégias *V-SPORT* obtiveram desempenho mais próximo ao ideal (*Epidemic*) ao longo de todos cenários utilizados. Além disso, a variação da capacidade de armazenamento em buffer não produziu impacto algum sobre o atraso médio apresentado pelas estratégias *V-SPORT*, em outras palavras, elas mais uma vez mostraram-se estáveis quando expostas a cenários dinâmicos.

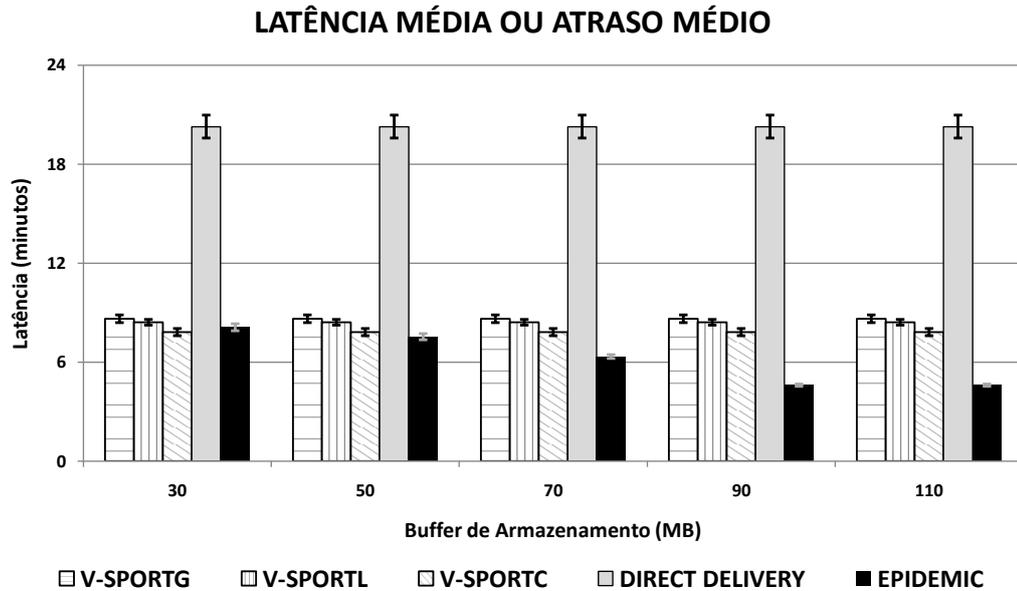


Figura 53: O impacto da variação do buffer de armazenamento sobre a latência ou atraso médio.

O *Epidemic*, por outro lado, mais uma vez apresentou desempenho instável quando a capacidade armazenamento em buffer variou, principalmente nos experimentos que utilizaram o menor valor de buffer (30MB). Sendo assim, os resultados gerados pelo *Epidemic*, para todas as métricas avaliadas, comprovam que muitas estratégias de roteamento apresentam bons resultados apenas quando são executadas dentro de cenários compostos por um conjunto ideal de parâmetros, no caso do *Epidemic*, alta capacidade de armazenamento em buffer e altas taxas de transmissão.

7.7 Considerações Finais

A estratégia de roteamento proposta pelo *V-SPORT* produziu resultados satisfatórios durante praticamente todas as etapas de simulação e para todos os cinco fatores de impacto analisados: (1) variação da densidade de rede; (2) variação do raio de transmissão dos veículos; (3) variação do tempo de vida das mensagens (*TTL*); (4) variação da velocidade dos veículos e (5) variação do tamanho do buffer de armazenamento. As

estratégias *V-SPORT* foram capazes de alcançar taxas de entrega similares ao protocolo epidêmico (próximas do ideal) ao mesmo tempo que produziram, em média, um *overhead* dez vezes menor. Esse desempenho foi alcançado sem que a suposição sobre a existência de serviços externos que obtém, gerenciam e repassam a informação sobre a localização dos veículos de destino fosse necessária.

A utilização e adaptação de técnicas conhecidas do ambiente DTN, como o histórico de contatos entre os nós, juntamente com metodologias propostas para o ambiente veicular, como é o caso da abordagem gulosa de encaminhamento de mensagens mostraram-se eficientes para os cenários de simulação analisados. Além disso, a definição dinâmica das rotas, onde apenas o próximo cruzamento pelo qual a mensagem deve trafegar é definido, produziu baixos *overheads* e altas taxas de entrega. Essas características mostram que os modelos de previsão e encaminhamento propostos pelo *V-SPORT* são capazes de obter resultados satisfatórios para um conjunto considerável de cenários.

8 Conclusão

A estratégia de roteamento *V-SPORT* alcançou os objetivos para qual foi proposta, atingindo taxas de entrega próximas ao ideal ao mesmo tempo em que utilizou uma quantidade reduzida de transmissões, obtendo como consequência um baixo *overhead* (i.e., número de mensagens trocadas). Além disso, ela apresentou desempenho estável quando exposta a diversos cenários, cada qual contendo fatores de impacto diferentes. Isso permitiu ao *V-SPORT* superar desafios conhecidos do ambiente tolerante a atrasos e desconexões como, por exemplo, o *tradeoff* envolvendo taxa de entrega e *overhead*. Como a alta mobilidade dos veículos não permite que as redes veiculares estejam totalmente conectadas e que rotas, ligando uma origem e um destino, sejam definidas no momento que o roteamento de uma mensagem é iniciado, tal característica incorre no desafio de obter-se uma taxa de entrega ótima (normalmente pautada pelo uso da replicação de mensagens) ao mesmo tempo em que os recursos de rede (canal de comunicação e armazenamento) não sejam consumidos rapidamente pelo elevado número de transmissões e consequente alto *overhead*.

As metodologias de previsão e encaminhamento propostas pelo *V-SPORTG* e *V-SPORTL* mostraram-se eficientes, e apresentaram resultados praticamente idênticos aos obtidos pelo modelo *V-SPORTC* que, assim como a maioria das estratégias de roteamento veicular, assumiu a existência de serviços externos de localização, utilizando a posição real dos veículos de destino. Esse desempenho mostra a capacidade do modelo proposto em manter seu funcionamento estável independente do cenário de comunicação enfrentado, ou seja, ainda que infraestruturas externas de comunicação estejam indisponíveis, por questões técnicas, geográficas ou financeiras. Além disso, o modelo de funcionamento apresentado pelo *V-SPORT* mostrou-se flexível, visto que é baseado em dois algoritmos específicos (previsão e encaminhamento) que trabalham de maneira independente e podem ser facilmente adaptados, permitindo a criação de novas estratégias. Essa característica traz uma contribuição importante para área de pesquisa, pois permite que novos estudos sejam propostos sob o modelo *V-SPORT* e novos resultados possam ser obtidos de maneira

mais eficiente, tornando possível que pesquisas tenham como foco apenas um dos modelos (previsão e encaminhamento), ou ambos.

8.1 Objetivos, Desafios e Resultados Alcançados

Na seção 1.1 foram definidos e propostos, como objetivos específicos a serem alcançados pela arquitetura de roteamento *V-SPORT*, os seguintes itens: (1) estimar e refinar a previsão sobre a localização dos veículos em áreas urbanas com arquitetura veicular pura; e (2) definir rotas de encaminhamento de mensagens dinâmicas e eficientes a partir dessa estimativa e refinamento.

Os resultados alcançados pelo *V-SPORT* mostram que o primeiro objetivo específico foi contemplado. Os resultados obtidos durante os experimentos efetuados na seção 7.6.1 mostram que os algoritmos de previsão propostos (distância euclidiana e deslocamento máximo) são capazes de refinar a estimativa sobre a localização do destino ao longo do tempo. Em outras palavras, a partir do momento em que as mensagens são encaminhadas na direção da localização prevista pelo modelo, informações mais atualizadas sobre o destino são obtidas, permitindo ao modelo de previsão refinar sua estimativa. A Tabela 9 e a Figura 35 comprovam essa afirmação, nelas é possível constatar que quanto mais próxima a mensagem está da última posição prevista, mais recentes são as informações coletadas sobre o destino e menores são os erros de previsão apresentados pelos modelos.

O segundo objetivos específico definido também foi contemplado. Os resultados alcançados durante os experimentos realizados na seção 7.6.1 mostram que os algoritmos de encaminhamento propostos pelo *V-SPORT* (distância euclidiana e menor caminho no mapa) são capazes de definir, dinamicamente, rotas eficientes de entrega para as mensagens, ou seja, eles são capazes de escolher, a cada salto da mensagem, caminhos que aproximam gradativamente as mensagens dos veículos de destino. Analisando a Tabela 10 e a Figura 36 é possível constatar que as mensagens se aproximam do destino ao longo do roteamento, isso ocorre devido a escolha adequada dos próximos cruzamentos pelos quais as mensagens irão trafegar. Essa escolha baseia-se na previsão sobre a localização do destino, o que também comprova a eficiência dos modelos e previsão.

Para garantir que os desafios e os objetivos específicos (“entrega vs *overhead*” e “desempenho vs cenários”) foram contemplados, os experimentos apresentados na seções 7.6.2 foram realizados. Os resultados obtidos mostram que as taxas de entrega e *overhead*

obtidos pelas estratégias *V-SPORT*, ao longo de praticamente todos os cenários propostos, ficaram sempre próximos ao ideal. Esse desempenho pôde ser visto em 4 dos 5 fatores de impacto (cenários) avaliados: densidade de rede, raio de alcance das antenas, velocidade dos veículos e buffer de armazenamento. O único cenário onde a taxa de entrega e o *overhead* não atingiram valores próximos ao ideal durante os experimentos foi durante variação do tempo de vida das mensagens (*TTL*). Entretanto, essa dinâmica só ocorreu para o menor valor de *TTL* analisado. Esses resultados mostram que o *V-SPORT* é eficiente em manter o seu desempenho mesmo quando os cenários se modificam, sendo capaz de superar o desafio do “desempenho vs cenário”, onde a mudança de determinados fatores provoca impactos significativos sobre o desempenho das estratégias de roteamento. Esse impacto pôde ser visto, por exemplo, nos péssimos resultados obtidos pelo *Epidemic* quando a capacidade de armazenamento em buffer dos nós diminui, Tabelas 25 e 26 e Figuras 51 e 52.

No que diz respeito a obtenção de altas taxas de entrega (próximas ao ideal) e baixos valores de *overhead* (entrega vs *overhead*), objetivo e desafio a serem superados pela arquitetura proposta, o *V-SPORT* atingiu resultados que permitem concluir que as duas métricas foram atendidas. Durante praticamente todos os experimentos, para os cinco fatores de impacto, as estratégias *V-SPORT* alcançaram altas taxas de entrega, ao mesmo tempo em que atingiram baixo *overhead*. Se compararmos, por exemplo, o *V-SPORT* com a estratégia epidêmica, ele atingiu, em média, taxas de entrega próximas a 97%, enquanto o *Epidemic* alcançou valores próximos a 99% (considerado ideal). Contudo, o *overhead* produzido pelo *V-SPORT* foi, em média, próximo a 11, enquanto o *Epidemic* atingiu valores próximos a 150, ou seja, 14 a 15 vezes maior, ainda que produzindo uma taxa de entrega apenas 2% superior. Os resultados citados podem ser vistos nas seções 7.6.2.1 a 7.6.2.4. Além disso, em cenários específicos, como o proposto na seção 7.6.2.5, o *Epidemic* chegou a apresentar taxas de entrega muito menores que o *V-SPORT*, aproximadamente 60% contra 97%, ao mesmo tempo em que obteve valores de *overhead* extremamente elevados, de 1000 a 1400 vezes maiores que os apresentados pelo *V-SPORT*. Esses resultados podem ser vistos nas Tabelas 25 e 26 e Figuras 51 e 52.

8.1.1 Perspectivas e Possibilidades

Ainda que os objetivos tenham sido alcançados, possibilitando que alguns dos desafios do ambiente VDTN fossem superados, os modelos de previsão e encaminhamento podem ser otimizados, tendo como intuito melhorar o desempenho da estratégia para as

métricas: taxa de entrega, *overhead* e atraso médio. Os resultados obtidos, durante os experimentos que validaram a eficiência do modelo de previsão (seção 7.6.1), mostram por exemplo, que a metodologia proposta pelo *V-SPORTG* e *V-SPORTL* possuem um aumento gradativo do erro de previsão. Em outras palavras, quanto mais defasada estiver a última informação conhecida sobre o veículo de destino maior o erro obtido. Apesar de seguir esse mesmo padrão (erro de previsão diretamente proporcional ao tempo de defasagem da informação sobre o destino), o modelo de previsão *V-SPORTL*, que considera o sentido das vias e a distância percorrida até um determinado conjunto de cruzamentos, apresentou resultados melhores que o *V-SPORTG*. Em contrapartida, os resultados obtidos para o modelo de encaminhamento proposto pelo *V-SPORTG*, nesta mesma etapa de experimentos, mostram que sua metodologia, baseada na distância euclidiana, é capaz de encaminhar mensagens de maneira mais eficiente, aproximando-as com maior rapidez do veículo de destino.

Apesar do melhor desempenho apresentado pela estratégia *V-SPORTG*, os dois modelos de encaminhamento de mensagens propostos apresentaram bons resultados e mostraram-se capazes de aproximar as mensagens do destino quando comparados com a estratégia *Direct Delivery*, que permite visualizar como as mensagens trafegam pelas vias quando não sofrem a influência de um algoritmo de encaminhamento. Entretanto, a metodologia proposta pelas estratégias *V-SPORT* apresentou resultados medianos para métrica de atraso médio durante as etapas de simulação. Ainda que tenham obtido, de maneira geral, desempenhos mais próximos do ideal, a latência média alcançou valores duas vezes maiores que os apresentados pela estratégia *Epidemic Oracle*. Esse comportamento acarretou na perda de desempenho da taxa de entrega em cenários onde o tempo de vida das mensagens é muito baixo, ocasionado, principalmente, pelo fato da estratégia *V-SPORT* depender de informações provenientes do histórico de encontros entre os nós. Como o histórico é gerado ao longo da trajetória dos veículos, que fazem contatos com outros nós, um determinado intervalo de tempo mostra-se necessário e acaba por consumir parte do tempo de vida das mensagens, que são descartadas antes mesmo de alcançarem o veículo de destino e serem entregues.

8.2 Trabalhos Futuros

As possibilidades de trabalhos futuros, levando em consideração as contribuições apresentadas pelo trabalho desenvolvido nesta tese, podem ser organizadas em duas linhas de estudo: a otimização e mescla dos modelos de previsão e roteamento propostos, e o

desenvolvimento de novas metodologias (técnicas) que podem ser agregadas a arquitetura *V-SPORT* ou podem, ainda, substituir os métodos utilizados por cada uma das três fases da estratégia.

8.2.1 Otimização e Mescla dos Modelos

Considerando o fato de que a estratégia *V-SPORTL* apresentou melhor desempenho (em grande parte dos experimentos) para o modelo de previsão sobre a localização do destino, e a estratégia *V-SPORTG* apresentou melhores resultados para o modelo de encaminhamento das mensagens, tem-se como trabalho futuro a construção de uma nova estratégia de roteamento baseada na mescla entre o modelo de previsão *V-SPORTL* e o modelo de encaminhamento *V-SPORTG*. Para o modelo de previsão, seria possível, ainda, a utilização integrada dos dois modelos propostos, visto que para informações sobre o destino que possuem menor tempo de defasagem (0–2 minutos) o *V-SPORTG* apresenta melhor desempenho, já para informações com maior tempo de defasagem (2–5 minutos) o *V-SPORTL* apresenta resultados superiores.

Adicionalmente a essa abordagem, e considerando que a estratégia *V-SPORT* possui um período de aquecimento, onde o processo de encaminhamento ainda não foi iniciado e as taxas de entrega são baixas (porque os veículos encontram-se em processo de preenchimento das suas tabelas de informação dos contatos), afetando o desempenho do *V-SPORT* em cenários onde as mensagens possuem baixo *TTL*, seria possível alocar o procedimento de replicação das mensagens neste intervalo de aquecimento inicial. Essa abordagem possibilitaria otimizar a taxa de entrega e o tempo médio de atraso, fazendo com que as cópias das mensagens percorressem, já no início do roteamento, caminhos distintos, e comesçassem a se aproximar do destino durante o período de aquecimento. A replicação das mensagens poderia ser utilizada dentro do *V-SPORT* de duas maneiras: (1) dentro da fase de previsão, ou seja, via modelo de replicação *Spray-and-Wait* adotado antes e depois do início das previsões; e (2) através da criação de uma nova fase, alocada antes da primeira fase (previsão). Essa abordagem faria com que a estratégia *V-SPORT* primeiro espalhasse todas as cópias das mensagens para só depois iniciar as etapas de previsão e encaminhamento.

Um segundo quesito, que pode ser estudado em maiores detalhes, diz respeito à melhoria do modelo de previsão da localização do destino. Novos métodos podem ser propostos tendo como base as informações atualmente coletadas durante o contato entre os veículos, já que a opção por manter a *TIC* com seu formato atual garante que o *overhead*

não seja incrementado, mantendo-o com os bons resultados obtidos nas simulações vistas no capítulo 7. Como as tabelas são trocadas entre os veículos durante os contatos, a opção por agregar novas informações a *TIC* impactaria no aumento da quantidade de dados que seriam transmitidos, acarretando, como consequência, no aumento do consumo dos recursos de rede.

8.2.2 Desenvolvimento de Novas Metodologias

Em contrapartida a manutenção do formato atual (dados coletados e armazenados) na *TIC*, trabalhos voltados a otimização do uso do espaço de armazenamento, possibilitariam que novas informações fossem agregadas sem impactar num crescimento demasiado da *TIC*. Eles permitiriam, ainda, que dados importantes pudessem ser considerados como, por exemplo, a quantidade de vezes em que um veículo trafega por uma determinada região (bairro) ou rua. Tais dados poderiam ser analisados tendo como base um período de tempo configurável, como dia, semana ou mês. Essa abordagem incorre na possibilidade da descoberta de padrões, onde as estratégias de roteamento tornam-se capazes de identificar locais recorrentes por onde os veículos costumam trafegar, sendo possível, ainda, definir os dias da semana e o período de tempo em que os veículos encontram-se em uma determinada região.

Esse procedimento faria com que as estratégias de roteamento pudessem operar não apenas com o conceito de contato oportunista, mas também com a possibilidade de previsão sobre o encontro entre dois veículos – com o conceito de contato programado. Neste contexto, algoritmos de descoberta de conhecimento poderiam ser utilizados sobre a base de dados criada através das informações coletadas pelos veículos. Novos trabalhos também seriam necessários para definir um formato adequado de armazenamento dos dados, que permitisse a execução dos algoritmos de descoberta de conhecimento. Estudos também precisariam ser efetuados para verificar e definir por quanto tempo os veículos manteriam esses dados armazenados, e quais seriam os limites máximos de armazenamento que estariam disponíveis para dar suporte a esse modelo. Sendo assim, estratégias de gerenciamento de buffer também seriam necessárias e gerariam uma nova demanda de trabalhos.

8.3 Contexto Histórico da Pesquisa

O trabalho apresentado nesta tese de doutorado possui um contexto histórico iniciado em 2010, quando o autor ingressou no mestrado em informática do Programa de Pós-graduação em Informática (PPGIa) da Pontifícia Universidade Católica do Paraná. Os estudos iniciais efetuados tiveram seu foco na computação ubíqua e sensibilidade ao contexto, linha de pesquisa seguida numa primeira etapa. Ao decorrer do mestrado, o autor mudou de área e passou a integrar o grupo de pesquisa de Sistemas Distribuídos, do qual continua fazendo parte atualmente. A partir desse momento os estudos voltaram-se para a área de roteamento de mensagens em ambientes tolerantes a atrasos e desconexões. Essa mudança, juntamente com o conhecimento adquirido sobre as duas áreas, levou a aplicação da sensibilidade ao contexto dentro do roteamento de mensagens em DTN. A partir dessa abordagem foi desenvolvida a dissertação de mestrado posteriormente intitulada de “*Velosent: Roteamento Sensível ao Contexto, Posição, Velocidade e Sentido dos Nós para DTN*”.

Desde os estudos desenvolvidos ao longo do mestrado, voltados ao roteamento de mensagens em DTN, a metodologia de encaminhar mensagens na direção do destino já era utilizada. Nela, a posição, velocidade e sentido dos nós eram utilizados como premissa. Contudo, naquele período, cenários DTN mais genéricos foram assumidos, contendo diversos tipos de nós trafegando livremente em qualquer direção, sem que obstáculos que impedissem seu deslocamento fossem considerados. Essa dinâmica fez com que os experimentos adotados tivessem como base cenários abertos contendo os modelos de mobilidade *Random Waypoint* e *Random Walk*. Métodos matemáticos utilizando os conceitos de movimento retilíneo, intersecção entre retas e máximos e mínimos foram empregados. Considerações importantes sobre o ambientes DTN como pouca capacidade de armazenamento e restrições de energia também foram assumidos. Para esses cenários o *Velosent* apresentou resultados satisfatórios.

Ao término do mestrado e início do doutorado novas ideias e possibilidades foram discutidas, e evidenciaram possíveis caminhos para otimizar o desempenho do modelo proposto até aquele momento, adaptando-o para operar em cenários mais realistas. A partir desses pressupostos, e dos posteriores direcionamentos dados durante a qualificação desta tese, uma nova área de conhecimento foi estudada em mais detalhes, as redes veiculares tolerantes a atrasos e desconexões ou VDTN. Esse tipo de DTN possui algumas características peculiares: os nós movem-se em trajetórias que respeitam o sentido das ruas, não há restrição de energia, e a capacidade de armazenamento e processamento são muito

maiores. Considerando essas questões, a pesquisa de doutorado buscou adequar a metodologia criada durante o mestrado, com intuito de construir uma estratégia de roteamento voltada à DTN veicular.

Após o levantamento das principais referências sobre o assunto, foi identificado que os principais trabalhos voltados ao roteamento de mensagens em VDTN assumem a existência de infraestruturas e serviços externos capazes de fornecer a localização de qualquer veículo da rede a qualquer momento. Para tal, as estratégias também consideram que todos os veículos encontram-se conectados permanentemente com as infraestruturas (pontos de acesso, semáforos inteligentes, etc.). Ao constatar que essa assunção é pouco realista, seja por fatores financeiros ou técnicos, ficou evidente que as pesquisas realizadas durante o mestrado tinham grande potencial para serem adaptadas e aplicadas ao ambiente veicular, como forma de prover roteamento de mensagens sem que infraestruturas e serviços fossem assumidos.

8.3.1 Professores e Colaboradores

Atualmente o grupo de pesquisa voltado a área de roteamento de mensagens em redes tolerantes a atrasos e desconexões é composto por 8 integrantes, entre professores e colaboradores:

- Alcides Calsavara (PUCPR): professor
- Henri Frederico Eberspacher (PUCPR): professor
- Luiz Augusto de Paula Lima Júnior. (PUCPR): professor
- Carlos Alberto Maziero (UFPR): colaborador
- Gil Eduardo de Andrade (IFPR): colaborador
- Gisane Aparecida Michelon (UNICENTRO): colaboradora
- José Aélío de Oliveira Júnior. (UFS): colaborador

Os professores Alcides, Luiz e Henri atuam como orientadores dos alunos ingressantes no mestrado e doutorado do PPGIa, o professor Maziero colabora na orientação e desenvolvimento das dissertações e teses, tendo sido inclusive co-orientador da dissertação de mestrado do Gil Eduardo. José Aélío e Gisane defenderam sua tese de doutorado no segundo semestre de 2015 e desde então colaboram com as pesquisas na área de DTN,

auxiliando na produção de experimentos, coleta de resultados e na escrita de artigos. Gil Eduardo é o autor desta tese e como colaborador, e agora ex-aluno, desenvolve as mesmas atividades exercidas pelos dois últimos colaboradores.

8.3.2 Produções Científicas

Dentre as produções científicas mais relevantes desenvolvidas pelo grupo nos últimos anos, e voltadas apenas a área de redes ad hoc e redes tolerantes a atrasos, tem-se:

ANDRADE, Gil Eduardo de; LIMA, L. A. P.; CALSAVARA, Alcides; OLIVEIRA JR, J. A.; MICHELLON, G. A. Message Routing in Vehicular Delay-Tolerant Networks Based on Human Behavior. In: *10th IEEE/IET International Symposium on Communication Systems, Networks and Digital Signal Processing*, 2016, Praga. Proceedings of CSNDSP 2016, 2016.

MICHELLON, G. A.; LIMA, L. A. P.; OLIVEIRA JR, J. A.; ANDRADE, Gil Eduardo de. A Weighted Centrality by Potential for Replica Relocation in MANETs. *International Journal of Computer and Electrical Engineering (IJCEE)*, v. 8, p. 151/10.17706-159, 2016.

MICHELLON, G. A.; LIMA, L. A. P.; OLIVEIRA JR, J. A.; ANDRADE, Gil Eduardo de. A Weighted Centrality by Potential for Replica Relocation in MANETs. In: *CIT 2016 - International Conference on Information Technology*, 2016, Melbourne. Proceedings of ICIT 2016, 2016.

OLIVEIRA JR, J. A.; LIMA JUNIOR, Luiz Augusto de Paula; MICHELLON, G. A.; ANDRADE, Gil Eduardo de. Anycasting in DTNs using Virtual Magnetic Fields. In: *The 11th Annual IEEE Consumer Communications Networking Conference*, 2014, Las Vegas. IEEE CCNC 2014 Conference Proceedings, 2014.

MICHELLON, G. A.; LIMA JUNIOR, Luiz Augusto de Paula; OLIVEIRA JR, J. A.; CALSAVARA, Alcides; ANDRADE, Gil Eduardo de. A Strategy for Data Replication in Mobile Ad Hoc Networks. In: *IEEE 22nd International Symposium on Modeling, Analysis and Simulation of Computer and Telecommunication Systems*, 2014, Paris. Proceedings

of IEEE 22nd International Symposium on Modeling, Analysis and Simulation of Computer and Telecommunication Systems, 2014.

ANDRADE, Gil Eduardo de; LIMA JUNIOR, Luiz Augusto de Paula; CALSAVARA, Alcides; MAZIERO, Carlos Alberto. Routing Protocol Based on the Position, Velocity, and Direction of the Nodes. In: *IEEE 27th International Conference on Advanced Information Networking and Applications AINA/FINA*, 2013, Barcelona. IEEE 27th International Conference on Advanced Information Networking and Applications Workshops. Barcelona: CPS – Conference Publishing Service, 2013. v. 1. p. 971-976.

Além das produções já publicadas encontra-se submetido o artigo: *A Greedy Routing Strategy Based on Euclidean Geometry for Vehicular Delay Tolerant Network* para revista IEEE Latin America Transactions – as correções solicitada pelos avaliadores já foram efetuadas e os autores aguardam a confirmação da publicação. O escrita do artigo: *Greedy Lightweight Spatially-Oriented Message Routing Algorithm for VDTNs* está sendo finalizada e o mesmo deve ser submetido no início de 2018 para revista Elsevier – Vehicular Communications.

Referências

- AHMED, S. H.; KANG, H.; KIM, D. Vehicular delay tolerant network (vdtm): Routing perspectives. *Consumer Communications and Networking Conference (CCNC), 12th Annual IEEE*, Las Vegas, NV, USA, jul. 2015.
- AL-SULTAN, S. et al. A comprehensive survey on vehicular ad hoc network. *J. Netw. Comput. Appl.*, Academic Press Ltd., London, UK, UK, v. 37, p. 380–392, jan. 2014.
- ANASTASI, G. et al. Energy conservation in wireless sensor networks: A survey. In: *Ad Hoc Networks*. [S.l.: s.n.], 2009. p. 537–568.
- BAI, F.; HELM, A. A survey of mobility models. In: *Wireless Ad Hoc and Sensor Networks*. [S.l.]: Kluwer Academic Publishers, 2004.
- BALASUBRAMANIAN, A.; LEVINE, B.; VENKATARAMANI, A. Dtn routing as a resource allocation problem. *SIGCOMM Comput. Commun. Rev.*, ACM, New York, NY, USA, v. 37, n. 4, p. 373–384, ago. 2007. ISSN 0146-4833. Disponível em: <http://doi.acm.org/10.1145/1282427.1282422>.
- BALICO, L. N. et al. A prediction-based routing algorithm for vehicular ad hoc networks. In: *20th IEEE Symposium on Computers and Communication (ISCC)*. [S.l.: s.n.], 2015. p. 365–370.
- BARCELOS, V. P. et al. Sistema de monitoramento de veículos usando dispositivos no padrão ieee 802.11p. In: *32th Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos (SBRC)*. [S.l.: s.n.], 2014. p. 939–951.
- BENAMAR, N. et al. Routing protocols in Vehicular Delay Tolerant Networks: A comprehensive survey. *Computer communications*, v. 48, n. 7, p. 141–158, Jul 2014.
- BILAL, S. M.; BERNARDOS, C. J.; GUERRERO, C. Position based routing in vehicular networks: A survey. *Journal of Network and Computer Applications*, v. 36, n. 2, p. 685–697, 2012.
- BURGESS, J. et al. MaxProp: Routing for Vehicle-Based Disruption-Tolerant Networking. In: *Proceedings of the IEEE INFOCOM 2005. 24th Annual Joint Conference of the IEEE*. [S.l.]: IEEE Press, 2006.
- BURLEIGH, S. et al. Delay-tolerant networking: an approach to interplanetary Internet. *IEEE Communications Magazine*, v. 41, n. 6, p. 128–136, jun. 2003.
- BURNS, B.; BROCK, O.; LEVINE, B. N. Mv routing and capacity building in disruption tolerant networks. In: *In Proc. IEEE INFOCOM*. [S.l.: s.n.], 2005. p. 398–408.
- CAMP, T.; BOLENG, J.; DAVIES, V. A survey of mobility models for ad hoc network research. *Wireless Communications And Mobile Computing (WCMC): Special issue on Mobile Ad Hoc Networking: Research, Trends and Applications*, v. 2, p. 483–502, 2002.

- CC, S. et al. A survey of routing and data dissemination in delay tolerant networks. *J. Netw. Comput. Appl.*, Academic Press Ltd., London, UK, UK, v. 67, n. C, p. 128–146, maio 2016.
- CERF, V. et al. Interplanetary internet (ipn): Architectural definition. In: *IPN Research Group, Technical Report*. [S.l.: s.n.], 2001. p. 1–59.
- CERF, V. et al. Delay-tolerant networking architecture. In: *Internet Engineering Task Force RFC Draft 4878*. [S.l.: s.n.], 2007. p. 1–35.
- CROWCROFT, J. et al. Promoting tolerance for delay tolerant network research. *SIGCOMM Comput. Commun. Rev.*, ACM, New York, NY, USA, v. 38, n. 5, p. 63–68, set. 2008.
- DEMMER, M. et al. *Implementing Delay Tolerant Networking*. [S.l.], 2003.
- DURST R., F. P. S. K. Why not use the standard internet suite for the interplanetary internet? In: *The MITRE Corporation, Technical Report*. [S.l.: s.n.], 2002. p. 1–13.
- EKMAN, F. et al. Working day movement model. In: *ACM SIGMOBILE workshop on Mobility Models*. [S.l.: s.n.], 2008. p. 33–40.
- FALL, K. A delay-tolerant network architecture for challenged internets. In: *Proceedings of the 2003 conference on Applications, technologies, architectures, and protocols for computer communications*. New York, NY, USA: ACM, 2003. (SIGCOMM '03), p. 27–34.
- FALL, K.; FARREL, S. Dtn: An architectural retrospective. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, v. 26, p. 828–836, may 2008.
- FARRELL, S. et al. When tcp breaks: Delay- and disruption- tolerant networking. In: *Proceedings of the IEEE Internet Computing*. [S.l.: s.n.], 2006. v. 10, p. 72–78.
- FENG, H. et al. Location prediction of vehicles in vanets using a kalman filter. *Wireless Personal Communications*, Springer, v. 80, p. 543–559, jan. 2015.
- FONSECA, A.; VAZÃO, T. M. Applicability of position-based routing for VANET in highways and urban environment. *J. Network and Computer Applications*, v. 36, n. 3, p. 961–973, 2013.
- FU, Q. et al. Dawn: A density adaptive routing algorithm for vehicular delay tolerant sensor networks. In: *Communication, Control, and Computing (Allerton), 2011 49th Annual Allerton Conference*. [S.l.]: IEEE, 2011. p. 1250–1257.
- GAVIRA, M. de O. *Simulação Computacional como uma Ferramenta de Aquisição de Conhecimento*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de São Carlos, Escola de Engenharia, São Carlos, São Paulo, Brasil, 2003.
- GÜNES, M.; WENIG, M. Models for Realistic Mobility and RadioWave Propagation for Ad-hoc Network Simulations. In: MISRA, S.; WOUNGANG, I.; CHANDRA, S. (Ed.). *Guide to Wireless Ad Hoc Networks*. [S.l.]: Springer, 2009. cap. 11, p. 255–280.
- HASBOLLAH, A.; ARIFFIN, S.; FISAL, N. Mobility prediction method for vehicular network using markov chain. *Jurnal Teknologi (Sciences Engineering)*, Penerbit UTM Press, v. 78, p. 7–13, jan. 2016.

- HERRMANN, K. Modeling the sociological aspects of mobility in ad hoc networks. In: *Proceedings of the 6th ACM International Workshop on Modeling Analysis and Simulation of Wireless and Mobile Systems*. New York, NY, USA: ACM, 2003. (MSWIM '03), p. 128–129.
- IEEE-1609.1. IEEE Trial-Use Standard for Wireless Access in Vehicular Environments - Security Services for Applications and Management Messages. *IEEE Std 1609.2-2006*, p. 1–70, 2006.
- IEEE-1609.11. IEEE Standard for Wireless Access in Vehicular Environments (WAVE) - Over-the-Air Electronic Payment Data Exchange Protocol for Intelligent Transportation Systems (ITS). *IEEE Std 1609.4-2010 (Revision of IEEE Std 1609.4-2006)*, p. 1–189, jan 2010.
- IEEE-1609.12. IEEE Standard for Wireless Access in Vehicular Environments (WAVE) - Identifier Allocations. *IEEE Std 1609.12-2012*, p. 1–20, 2012.
- IEEE-1609.2. IEEE Draft Standard for Wireless Access in Vehicular Environments - Security Services for Applications and Management Messages. *IEEE P1609.2/D12*, p. 1–266, jan 2012.
- IEEE-1609.3. IEEE Trial-Use Standard for Wireless Access in Vehicular Environments (WAVE) - Networking Services. *IEEE Std 1609.3*, p. 1–99, 2012.
- IEEE-1609.4. IEEE Standard for Wireless Access in Vehicular Environments (WAVE) - Multi-channel Operation. *IEEE Std 1609.4-2010 (Revision of IEEE Std 1609.4-2006)*, p. 1–89, 2010.
- ISENTO, J. I. et al. Vehicular delay-tolerant networks – a novel solution for vehicular communications. *IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine*, v. 5, n. 4, p. 10–19, October 2013.
- JAIN, S.; FALL, K.; PATRA, R. Routing in a delay tolerant network. In: *ACM SIG-COMM Computer Communication Review*. [S.l.: s.n.], 2004. v. 34, p. 145–158.
- JERBI, M. et al. Gytar: Improved greedy traffic aware routing protocol for vehicular ad hoc networks in city environments. *Proceedings of the 3rd international workshop on Vehicular ad hoc networks (ACM)*, p. 88–89, 2006.
- JIANG, D.; DELGROSSI, L. Ieee 802.11 p: Towards an international standard for wireless access in vehicular environments. In: IEEE. *IEEE Vehicular Technology Conference, VTC Spring*. [S.l.], 2008. p. 2036–2040.
- JONES, E. P. C.; LI, L.; WARD, P. A. S. Practical routing in delay-tolerant networks. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, p. 237–243, 2005.
- JUANG, P. et al. Energy-efficient computing for wildlife tracking: Design tradeoffs and early experiences with zebranet. In: *10th Annual Conference on Architectural Support for Programming Languages and Operating Systems*. [S.l.: s.n.], 2002. p. 96–107.
- KANG, H. et al. Routing protocols for vehicular delay tolerant networks: A survey. *Int. J. Distrib. Sen. Netw.*, Taylor & Francis, Inc., Bristol, PA, USA, v. 2015, p. 4:4–4:4, jan. 2015.

- KARAGIANNIS, G. et al. Vehicular Networking: A Survey and Tutorial on Requirements, Architectures, Challenges, Standards and Solutions. *Communications Surveys & Tutorials, IEEE*, IEEE, v. 13, n. 4, p. 584–616, 2011.
- KARL, H.; WILLIG, A. *Protocols and Architectures for Wireless Sensor Networks*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2005. ISBN 0470095105.
- KARP, B.; KUNG, H. T. Gpsr: Greedy perimeter stateless routing for wireless networks. *Proceedings of the 6th annual international conference on Mobile computing and networking (ACM)*, p. 243–254, 2000.
- KERÄNEN, A.; OTT, J.; KÄRKKÄINEN, T. The ONE Simulator for DTN Protocol Evaluation. In: *SIMUTools '09: Proceedings of the 2nd International Conference on Simulation Tools and Techniques*. New York, NY, USA: ICST, 2009.
- KNORR, F. et al. Reducing traffic jams via vanets. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, v. 61, n. 8, p. 3490–3498, 2012.
- KURHINEN, J.; JANATUINEN, J. Delay tolerant routing in sparse vehicular ad hoc networks. *Acta Electrotechnica et Informatic*, v. 8, n. 3, p. 7–13, 2008.
- LEONTIADIS, I.; MASCOLO, C. Geopps: Geographical opportunistic routing for vehicular networks. In: *IEEE International Symposium on World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks – WoWMoM 2007*. [S.l.]: IEEE, 2007. p. 1–6.
- LI, F.; WANG, Y. Routing in vehicular ad hoc networks: A survey. *IEEE Vehicular Technology Magazine*, v. 2, n. 2, p. 12–22, Jun 2007.
- LI, F.; WANG, Y. Routing in vehicular ad hoc networks: A survey. *IEEE Vehicular Technology Magazine*, v. 2, n. 2, June 2007.
- LINDGREN, A. et al. Probabilistic routing protocol for intermittently connected networks. In: *Internet Engineering Task Force RFC Draft*. [S.l.: s.n.], 2011.
- LINDGREN, A.; DORIA, A.; SCHELÉN, O. Probabilistic routing in intermittently connected networks. *SIGMOBILE Mob. Comput. Commun. Rev.*, ACM, New York, NY, USA, v. 7, n. 3, p. 19–20, jul. 2003.
- LIU, J. et al. A survey on position-based routing for vehicular ad hoc networks. *Telecommun. Syst.*, Kluwer Academic Publishers, Norwell, MA, USA, v. 62, n. 1, p. 15–30, maio 2016.
- LO, W.-Z.; GAO, J.-S.; LO, S.-C. Distance-aware routing with copy control in vehicle-based dtns. In: *VTC Spring*. [S.l.]: IEEE, 2012. p. 1–5.
- LOCHERT, C. et al. A routing strategy for vehicular ad hoc networks in city environments. *Proceedings of IEEE intelligent vehicles symposium*, p. 156–161, 2003.
- MUSOLESI, M.; HAILES, S.; MASCOLO, C. Adaptive routing for intermittently connected mobile ad hoc networks. In: *Proceedings of the Sixth IEEE International Symposium on World of Wireless Mobile and Multimedia Networks*. Washington, DC, USA: IEEE Computer Society, 2005. (WOWMOM '05), p. 183–189.

- NUNES, C.; DOTTI, F. Uma nova estratégia de roteamento para redes tolerantes a atrasos. In: *XXVII Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos*. [S.l.: s.n.], 2009. p. 757–770.
- OLIVEIRA, C.; ALBUQUERQUE, C. Análise do protocolo nectar em cenários com mobilidade e frequentes interrupções. In: *XXVII Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos*. [S.l.: s.n.], 2009. p. 771–784.
- OLIVEIRA, C.; DUARTE, O. Uma análise da probabilidade de entrega de mensagens em redes tolerantes a atrasos e desconexões. In: *XXV Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos*. [S.l.: s.n.], 2009. p. 293–305.
- OLIVEIRA, C. et al. Redes tolerantes a atrasos e desconexões. In: *Minicurso do Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores (SBRC)*. [S.l.: s.n.], 2007. p. 203–256.
- OLIVEIRA, C. T. d. et al. Uma proposta de roteamento probabilístico para redes tolerantes a atrasos e desconexões. In: *XXVI Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos*. Rio de Janeiro, RJ, Brasil: SBRC, 2008. p. 735–748.
- OLIVEIRA, C. T. de. *Uma Proposta de Roteamento Probabilístico para Redes Tolerantes a Atrasos e Desconexões*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Rio de Janeiro, Programa de Pós-Graduação em Engenharia, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2008.
- PENTLAND, A. S.; FLETCHER, R.; HASSON, A. Daknet: Rethinking connectivity in developing nations. *Computer*, v. 37, n. 1, p. 78–83, jan. 2004.
- QIN, L.; KUNZ, T. *Survey on mobile ad hoc network routing protocols and cross-layer design*. [S.l.], 2004.
- SÁNCHEZ, M.; MANZONI, P. Anejos: A java based simulator for ad hoc networks. *Future Gener. Comput. Syst.*, Elsevier Science Publishers B. V., Amsterdam, The Netherlands, The Netherlands, v. 17, n. 5, p. 573–583, mar. 2001.
- SCOTT, K.; BURLEIGH, S. Bundle protocol specification. In: *Internet Engineering Task Force RFC Experimental 5050*. [S.l.: s.n.], 2007.
- SCOTT K.; BURLEIGH, S. Bundle protocol specification. In: *Request for Comments: 5050*. [S.l.: s.n.], 2007. p. 50.
- SEGUNDO, F. R.; SILVA, E. Silveira e; FARINES, J.-M. A dtn routing strategy based on neural networks for urban bus transportation system. *J. Netw. Comput. Appl.*, Academic Press Ltd., London, UK, UK, v. 64, n. C, p. 216–228, abr. 2016.
- SETH, A. et al. Low-cost communication for rural internet kiosks using mechanical backhaul. In: *Proceedings of the 12th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking*. New York, NY, USA: ACM, 2006. (MobiCom '06), p. 334–345.
- SHAREF, B. T.; ALSAQOUR, R. A.; ISMAIL, M. Review: Vehicular communication ad hoc routing protocols: A survey. *J. Netw. Comput. Appl.*, Academic Press Ltd., London, UK, UK, v. 40, p. 363–396, abr. 2014.

- SMALL, T.; HAAS, Z. Resource and performance tradeoffs in delay tolerant networks. In: *Proceedings of the ACM Special Interest Group on Data Communication (SIGCOMM)*. [S.l.: s.n.], 2005. p. 260–267.
- SOARES, V. N. G. J.; RODRIGUES, J. J. P. C.; FARAHMAND, F. Geospray: A geographic routing protocol for vehicular delay-tolerant networks. *Inf. Fusion*, Elsevier Science Publishers B. V., Amsterdam, The Netherlands, The Netherlands, v. 15, p. 102–113, jan. 2014.
- SPYROPOULOS, T.; PSOUNIS, K.; RAGHAVENDRA, C. S. Single-copy routing in intermittently connected mobile networks. *Sensor and Ad Hoc Communications and Networks – IEEE SECON*, IEEE Communications Society Conference on, p. 235–244, jan. 2004.
- SPYROPOULOS, T.; PSOUNIS, K.; RAGHAVENDRA, C. S. Spray and wait: an efficient routing scheme for intermittently connected mobile networks. In: *Proceedings of the 2005 ACM SIGCOMM workshop on Delay-tolerant networking*. New York, NY, USA: ACM, 2005. (WDTN '05), p. 252–259.
- SPYROPOULOS, T.; PSOUNIS, K.; RAGHAVENDRA, C. S. Efficient routing in intermittently connected mobile networks: The single-copy case. *IEEE/ACM Trans. Netw.*, IEEE Press, Piscataway, NJ, USA, v. 16, n. 1, p. 63–76, fev. 2008. ISSN 1063-6692. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1109/TNET.2007.897962>.
- TAN, K.; ZHANG, Q.; ZHU, W. Shortest path routing in partially connected ad hoc networks. In: *IEEE Globecom 03*. IEEE, 2003. Disponível em: <http://research.microsoft.com/apps/pubs/default.aspx?id=76639>.
- TANG, D.; BAKER, M. Analysis of a local-area wireless network. In: *Proceedings of the 6th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking*. New York, NY, USA: ACM, 2000. (MobiCom '00), p. 1–10.
- TERROSO-SAEENZ, F. et al. A cooperative approach to traffic congestion detection with complex event processing and vanet. *IEEE Trans. Intelligent Transportation Systems*, v. 13, n. 2, p. 914–929, 2012.
- TIAN, D.; SHAFIEE, K.; LEUNG, V. C. M. Position-based directional vehicular routing. In: *GLOBECOM*. [S.l.]: IEEE, 2009. p. 1–6.
- TOURNOUX, P. U. et al. The Accordion Phenomenon: Analysis, Characterization, and Impact on DTN Routing. In: *IEEE INFOCOM 2009 - The 28th Conference on Computer Communications*. [S.l.]: IEEE, 2009. p. 1116–1124.
- TUDUCE, C.; GROSS, T. A mobility model based on WLAN traces and its validation. In: *Proceedings IEEE 24th Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies*. [S.l.]: IEEE, 2005. v. 1, p. 664–674.
- UZCÁTEGUI, R. A.; ACOSTA-MARUM, G. Wave: A tutorial. *Comm. Mag.*, IEEE Press, Piscataway, NJ, USA, v. 47, n. 5, p. 126–133, maio 2009.
- VAHDAT, A.; BECKER, D. *Epidemic Routing for Partially-Connected Ad Hoc Networks*. [S.l.], 2000.

WARTHMAN, F. *Delay-Tolerant Networks (DTNs) - A Tutorial*. 2003. Disponível em: http://www.ipnsig.org/reports/DTN_Tutorial11.pdf.

WEISER, M. The computer for the 21st century. *SIGMOBILE Mob. Comput. Commun. Rev.*, ACM, New York, NY, USA, v. 3, n. 3, p. 3–11, jul. 1999.

WISITPONGPHAN, N. et al. On the routing problem in disconnected vehicular ad-hoc networks. In: *Proceedings of the IEEE INFOCOM 2007 - 26th IEEE International Conference on on Computer Communications*. Washington, DC, USA: IEEE Computer Society, 2007. p. 2291–2295.

XIA, Y.; YEO, C. K. Mobile internet access over intermittent network connectivity. *J. Netw. Comput. Appl.*, Academic Press Ltd., London, UK, UK, v. 40, p. 126–138, abr. 2014.

ZHANG, Z. Routing in intermittently connected mobile ad hoc networks and delay tolerant networks: overview and challenges. *Communications Surveys & Tutorials, IEEE*, IEEE, v. 8, n. 1, p. 24–37, mar. 2006.